

**Untersuchungen an ungeschädigten und durch
Pilzbefall geschädigten Nadelholzbauteilen mit
ausgewählten Prüfverfahren**

genehmigte Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt an der
Fakultät Maschinenwesen
der Technischen Universität Dresden

von

Dipl.-Ing. Thomas Baron

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am
F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde,
Fakultät Bauingenieurwesen
der Bauhaus-Universität Weimar

Tag der Disputation: 05.10.2009

Vorsitzender der Promotionskommission:
Prof. Dr. rer. nat. habil. T. Bley

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. A. Wagenführ
Prof. Dr.-Ing. habil. J. Stark
Dr.-Ing. A. Hasenstab

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde der Bauhaus-Universität Weimar.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. André Wagenführ, der stets fachlich beratend zur Seite stand und gemeinsam mit Frau Dr.-Ing. Ulrike Kröppelin Impulse für die Bearbeitung setzte. An dem von Prof. Wagenführ geleiteten Institut für Holz- und Papiertechnik der Technischen Universität Dresden wurden dankenswerter Weise einige Laboruntersuchungen durchgeführt, deren Ergebnisse in die Arbeit eingeflossen sind.

Ein Großteil der Untersuchungen und die Auswertung der umfangreichen Daten erfolgte am F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde in Weimar. Das Institut wird von Prof. Dr.-Ing. habil. Jochen Stark geleitet, dem ich für seine Unterstützung bei der Arbeit herzlich danke. Wertvoll waren die fachlichen Gespräche mit Herrn Dr.-Ing. Wolfgang Erfurt zu Fragen des Ultraschalls und mit Herrn Dr.-Ing. Karl Riedel, der zu holztechnischen Fragestellungen Anregungen gab. Herzlich gedankt sei Herrn Dr.-Ing. Gerd Häselbarth für die Anmerkungen zu statistischen Methoden. Ebenso möchte ich Herrn Dr.-Ing. Hans-Bertram Fischer danken, der mich stets bei der praktischen Umsetzung unterstützte. Herr Bernd Wicht gab freundlicherweise Anregungen zur Formatierung der Arbeit.

Die Forschung an Holz mit Ultraschallecho wird erst seit wenigen Jahren praktiziert und Herr Dr.-Ing. Andreas Hasenstab hat mir die Möglichkeit gegeben, aktiv die Anwendung des Verfahrens kennen zu lernen. Ihm gebührt besonderer Dank für seine Hilfe und Unterstützung, die vielen fachlichen Hinweise zu den zerstörungsfreien und zerstörungsarmen Prüfverfahren und die stets konstruktive und kritische Diskussion.

Das verwendete Bohrwiderstandsmessgerät wurde von Herrn Martin Hunger der Firma IML aus Wiesloch zur Verfügung gestellt. Vielen Dank für die Geduld bei der Überlassung des Gerätes.

Im Rahmen Ihrer praktischen Tätigkeit standen die Auszubildenden Frau Jana Riemekasten und Herr Thomas Bottin dankenswerter Weise engagiert zur Verfügung.

Die Untersuchungsergebnisse einiger von mir betreuter studentischer Arbeiten konnten ergänzend genutzt werden. Für ihr Engagement möchte ich Herrn Robert Ganss, Frau Katharina Köber, Herrn Ulf Tenner, Herrn Matthias Baumgartner und Herrn Maik Sulze danken.

Für die schnelle und unkomplizierte Hilfe beim Sägen der Probekörper möchte ich Herrn Andreas Riese von der Holzbauwerkstatt der Fakultät Gestaltung an der Bauhaus-Universität Weimar Dank aussprechen. Er ermöglichte auch sehr kurzfristige Prüfkörper einschnitte. Der Einstieg in die Welt der analytischen Signalverarbeitung wurde mir durch Herrn Dr.-Ing. Peter Brettschneider und Herrn Dr.-Ing. Christoph Weidling erleichtert. Für ihre Hinweise möchte ich mich bedanken.

Während der Bearbeitung und insbesondere in den letzten Monaten der Fertigstellung der vorliegenden Schrift hat mich meine Frau Anja ganz besonders dadurch unterstützt, dass Sie mir die Ausweitung meiner Arbeitszeit ermöglichte. Dafür ganz herzlichen Dank, wie auch für das Korrekturlesen von ihr und meinen Schwiegereltern Renate und Werner.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	9
2	ZIEL DER UNTERSUCHUNGEN UND AUFBAU DER ARBEIT	11
3	DER WERKSTOFF HOLZ UND DESSEN SCHÄDIGUNGEN DURCH PILZE	14
3.1	Holzkundliche Grundlagen (Kapitelauswahl)	14
3.1.1	Anatomie des Holzes	14
3.1.1.1	Makroskopischer Aufbau	14
3.1.1.2	Mikroskopischer und Submikroskopischer Aufbau	17
3.1.2	Chemie des Holzes	19
3.1.2.1	Hauptbestandteile	19
3.1.2.2	Nebenbestandteile	21
3.1.3	Physik des Holzes	22
3.1.3.1	Übersicht	22
3.1.3.2	Rohdichte	23
3.1.3.3	Feuchtigkeitsverhalten	23
3.2	Holzschädigungen durch Pilze	26
3.2.1	Klassifizierung und Lebensweise der Pilze	26
3.2.2	Abbauvorgänge	29
4	FESTIGKEITS- UND ELASTIZITÄTSASPEKTE VON ALTHOLZ	31
4.1	Druckfestigkeit	31
4.2	Biegefestigkeit	32
4.3	Biege-E-Modul	34
4.4	Bruchschlagfestigkeit	35
5	AUSGEWÄHLTE ZERSTÖRUNGSFREIE UND -ARME PRÜFVERFAHREN ZUR CHARAKTERISIERUNG VON HOLZ	37
5.1	Ultraschall am Holz	37
5.1.1	Grundlagen	37
5.1.2	Echotechnik	40
5.1.3	Einflussgrößen	41
5.1.3.1	Faserrichtung	41
5.1.3.2	Feuchtigkeit	42
5.1.3.3	Rohdichte	43
5.1.3.4	Äste	43
5.1.3.5	Altholz und Holzschädigungen	44
5.1.4	Messdarstellung	45

5.2 Bohrwiderstand	47
5.2.1 Verfahren	47
5.2.2 Einflussgrößen	48
5.2.2.1 Rohdichte	48
5.2.2.2 Äste und Risse	49
5.2.2.3 Feuchtigkeit	50
5.2.2.4 Holzschädigungen	50
5.2.2.5 Bohrtrend	51
5.2.2.6 Verlaufen	51
5.2.2.7 Verdrillung	52
5.2.2.8 Abnutzung	52
5.2.3 Messdarstellung	52
 6 METHODIK UND ERGEBNISSE	 55
6.1 Methodik der Prüfkörpererfassung und Statistik	55
6.1.1 Probengewinnung	55
6.1.2 Geometrische Erfassung	55
6.1.3 Technische Kennwerte	56
6.1.4 Nachsortierung	58
6.1.5 Schadensübergangsbereich	59
6.1.6 Angewandte statistische Methoden	60
 6.2 Ultraschallecho	 62
6.2.1 Methodik	62
6.2.1.1 Prüfeinrichtung	62
6.2.1.2 Prüfkörper	63
6.2.1.3 Auswertung	63
6.2.2 Messergebnisse und Auswertung	67
6.2.2.1 Kennwerte	67
6.2.2.2 Schallgeschwindigkeit und Rohdichte	68
6.2.2.3 Schallgeschwindigkeit und Querschnitt	70
6.2.2.4 Schallgeschwindigkeit und Feuchtigkeit	71
6.2.2.5 Äste	72
6.2.2.6 Risse	75
6.2.2.7 Schadensübergangsbereich	80
6.2.2.8 Oberflächenwellen	83
6.2.2.9 Arrayankopplung	85
6.2.3 Zusammenfassung der Ergebnisse der Ultraschallechomessungen	86
 6.3 Bohrwiderstand	 88
6.3.1 Methodik	88
6.3.1.1 Prüfeinrichtung	88
6.3.1.2 Holzprismen	88
6.3.1.3 Balken	89
6.3.1.4 Auswertung	90
6.3.2 Messergebnisse und Auswertung	91
6.3.2.1 Holzprismen	91
6.3.2.2 Balken	98
6.3.3 Zusammenfassung der Ergebnisse der Bohrwiderstandsmessungen	113
 6.4 Druckprüfungen	 115
6.4.1 Methodik	115
6.4.2 Messergebnisse und Auswertung	115
6.4.2.1 Kennwerte	115
6.4.2.2 Druckfestigkeit	116
6.4.2.3 Schadensübergangsbereich	118
6.4.3 Zusammenfassung der Ergebnisse der Druckprüfungen	120

6.5	Biegeprüfungen und Biege-E-Modul	121
6.5.1	Methodik	121
6.5.2	Messergebnisse und Auswertung	124
6.5.2.1	Balken	124
6.5.2.2	Holzprismen	129
6.5.3	Zusammenfassung der Ergebnisse der Biegeprüfungen	135
6.6	Schlagbiegeprüfungen	137
6.6.1	Methodik	137
6.6.2	Messergebnisse und Auswertung	137
6.6.2.1	Kennwerte	137
6.6.2.2	Schlagbiegefestigkeit	138
6.6.2.3	Schadensübergangsbereich	139
6.6.3	Zusammenfassung der Ergebnisse der Schlagbiegeprüfungen	141
7	ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE DER UNTERSUCHUNGEN	142
8	KOMBINATION DER EINZELUNTERSUCHUNGEN UND BEWERTUNG	146
8.1	Prismen	146
8.2	Balken	149
8.2.1	Ultraschallecho	149
8.2.2	Bohrwiderstand	151
9	SCHLUSSBETRACHTUNG	154
9.1	Praktische Umsetzung der Ergebnisse	154
9.1.1	Hinweise zur Bemessung	154
9.1.2	Praxisanwendung	155
9.2	Zusammenfassung	158
9.3	Ausblick	161
	LITERATUR- UND QUELLENVERZEICHNIS	162
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	169
	TABELLENVERZEICHNIS	173
	ANHANGVERZEICHNIS	174

Abkürzungen

3D	dreidimensional, räumlich
Abb.	Abbildung
bzw.	beziehungsweise
C 16, C 24, C 30	Festigkeitsklasse für Nadelholz
CAD	Computer-unterstütztes Entwerfen (computer-aided design)
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	Europäische Norm
Fa.	Firma
FI	Fichte
FIA	Fichten- Altholz, ungeschädigt
FIG	Fichten- Altholz, geschädigt
FIN	Fichten- Neuholz
Gl.	Gleichung
k. A.	keine Angabe
KI	Kiefer
KIA	Kiefern- Altholz, ungeschädigt
KIG	Kiefern- Altholz, geschädigt
KIN	Kiefern- Neuholz
LA	Lärche
LAN	Lärchen- Neuholz
lat.	lateinisch
M	Mittellamelle
P	Primärwand
r	radial
rel.	relativ
S ₁ , S ₂ , S ₃	Sekundärwand 1, 2 und Sekundärwand 3 bzw. Tertiärwand
S 7, S 10, S 13	Sortierklassen nach visueller Sortierung
spp.	Spezies- mehrere Arten
S _R 7, S _R 10, S _R 13	Modifizierte Sortierklassen nach visueller Sortierung
t	tangential
TA	Tanne
Tab.	Tabelle
tr	tangential-radial
u. a.	unter anderem
vgl.	vergleiche
z. B.	zum Beispiel

Formelzeichen

lateinisch

A	Ästigkeit
b	Breite
B _w	Bohrwiderstand
C	Kohlenstoff
D	Durchlässigkeitsfaktor
E	hier: Biege-E-Modul
F	Kraft
f	Festigkeitsprüfung/Elastizität: Durchbiegung in Trägermitte
f	Akustik: Frequenz
f _{5%}	Wertevergleich für 5 %-Quantil
f _{m,k}	Charakteristischer Kennwert der Biegefestigkeit nach DIN 1052
f _{m,d}	Bemessungswert der Biegefestigkeit nach DIN 1055-100
F _{exp.}	Quotient aus Anpassungsdefekt und Versuchsstreuung
F _{Tab.}	Tabellenwert, Vergleichswert zu F _{exp.}
H	Wasserstoff
h	Höhe
I _{BW}	relatives Bohrwiderstandsintegral
I _y	axiales Flächenträgheitsmoment
k _{mod}	Faktor zur Modifikation des Bemessungswertes nach DIN 1055-100
l	Länge
ln	natürlicher dekadischer Logarithmus
M _y	Biegemoment
n	Untersuchungen: Prüfanzahl der Stichprobe
n	Holzchemie: Polymerisationsgrad
O	Sauerstoff
P _{Bw0}	Leerlaufleistung im Freilaufbetrieb
P _s	Schnittleistung am Nadelkopf
P _v	Leistung zur Spanverdrängung nach dem Schnitt
P _R (x)	Laufleistung im Bohrloch in Abhängigkeit vom Bohrweg x
Qz	Querschnittszone
R	Akustik: Reflexionsfaktor
R	Holzsortierung: Risstiefe
r _{xy} , r _m	Korrelationskoeffizient
s	Standardabweichung
v	Statistik: Variationskoeffizient
v _D	Akustik: Geschwindigkeit der Dehnwelle
v _D	Akustik: Geschwindigkeit der Dehnwelle
v _L	Akustik: Geschwindigkeit der Longitudinalwelle
v _T	Akustik: Geschwindigkeit der Transversalwelle
w	Bruchschlagarbeit
\bar{x}	Mittelwert einer Stichprobe
\hat{y}	Erwartungswert, statistisch abgeschätzt
Z	Schallkennimpedanz
z	Abstand von der Nulllinie

griechisch

α_{BW}	Winkel zwischen Bohrrichtung und Jahrringtangente
η_{BW}	geräteabhängiger Bohrwiderstandsfaktor
γ_m	Teilsicherheitsbeiwert nach DIN 1055-100
ε	Elastizität: Dehnung
ε	Statistik: Residuen (Summe der Quadrate der Abweichungen)
λ	Wellenlänge
ρ	Rohdichte
ρ_{mean}	Rohdichte, Mittelwert der Stichprobe
σ_D	Druckspannung bzw. Druckfestigkeit
σ_B	Biegespannung bzw. Biegefestigkeit
ω	Feuchtegehalt des Holzes

Maßeinheiten

lateinisch

$^{\circ}\text{C}$	Grad Celsius
%	Prozent
cm	Zentimeter
cm^2	Quadratcentimeter
cm^3	Kubikcentimeter
dB	Dezibel
g	Gramm
h	Stunde
Hz	Hertz
kg	Kilogramm
kHz	Kilohertz
m	Meter
m^2	Quadratmeter
m^3	Kubikmeter
min	Minute
mm	Millimeter
mm^2	Quadratmillimeter
N	Newton
s	Sekunde

griechisch

μm	Mikrometer
μs	Mikrosekunde

1 Einleitung

Holz zählt zu den ältesten Baustoffen des Menschen. Bereits prähistorische Funde weisen die auch heute noch verwendeten Zapfen- oder Zangenkonstruktionen auf, die sich als vom Holzbau entlehnte Verbindungstechniken auch an Megalithbauten nachweisen lassen (Abb. 1). In der Antike wurden solche Nachbildungen zu wahrer Meisterschaft geführt. Nach [Vitruv, etwa 25 v. Chr.] können die stilisierten Konstruktionsformen des griechischen Tempelbaus aus dem Holzbau abgeleitet werden.

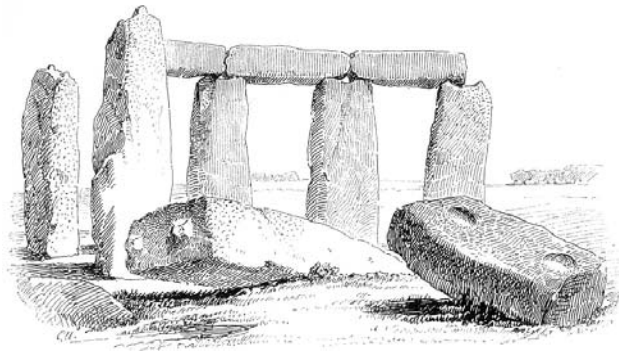


Abb. 1: Zapfen- und Dornausbildung bei Megalithbauten [Uhde, 1903]

Im Mittelalter gelangte der Baustoff Holz zur Blüte und fand sowohl für die frühen sakralen Bauwerke als auch für die sich entwickelnden Städte Verwendung. Auch für die einfachen bäuerlichen Behausungen und Ställe wurde Holz universell angewandt und man spricht zu recht vom Holzzeitalter. Der historisch romantisierte Blick darf nicht über die Tatsache hinwegtäuschen, dass es ständiger Erneuerungsprozesse bedurfte, um die auftretenden Schäden an den Holzkonstruktionen zu beheben. Archäologische Forschungen bestätigten beispielsweise, dass ein mittelalterliches Holzhaus in Danzig nur 20 - 25 Jahre nutzbar war und dann neu errichtet werden musste [Stark und Wicht, 1995]. Die heute bestaunten mittelalterlichen Fachwerkhäuser repräsentieren also nur die wenigen Bauten, bei denen der bauliche Holzschutz auf die Exposition abgestimmt und damit bei guter Wartung und Pflege eine lange Lebensdauer möglich war. Die Dauerhaftigkeit der Konstruktion wird in erster Linie von der Qualität des baulich-konstruktiven Holzschutzes bestimmt.

Anfänglich kleine Unzulänglichkeiten bei Abdeckungen oder im Anschlussdetail führen mittel- und langfristig zu schwerwiegenden konstruktiven Schäden. Die Anzeichen von potenziellen oder bereits aktiven Holzzerstörungen durch Pilze und Insekten werden nur bei regelmäßigen und gründlichen Wartungsgängen am Bauwerk erkannt. Die turnusmäßige Prüfung bestehender Holz- bzw. Ingenieurkonstruktionen gehört damit zu den wichtigsten Aufgaben in den kommenden Jahren. Einerseits müssen die bei der Errichtung des Bauwerkes angesetzten Belastungsgrößen und Beanspruchungsarten mit dem Ist-Zustand verglichen werden, andererseits ist die Ausführungstechnologie des Tragelementes und seiner Verbindungsmittel mit den wissenschaftlich-technischen Erkenntnissen abzugleichen. Damit ergibt sich die zwingende Notwendigkeit, altes Konstruktionsholz bei Übernahme tragender Funktionen genauer zu untersuchen [Görlacher (1), 1991].

Unabhängig von der technischen Entwicklung der Prüfmethode und Prüfgeräte, beispielsweise durch die Integration elektronischer Komponenten, sind die visuelle Kontrolle und die persönliche Einschätzung des Gutachters unentbehrlich und steht am Anfang jeder Bauwerksprüfung. Erst danach schließt sich die Kontrolle mit technischer Unterstützung an. Die zerstörungsfreien und zerstörungsarmen Verfahren leisten einen wichtigen Beitrag, die

aus den Erfahrungen des Prüfers resultierenden Vermutungen zu überprüfen. Die technischen Untersuchungen bestehender Holzbauwerke sind besonders darauf ausgelegt, nicht sichtbare Schäden, wie Innenfäule, zu detektieren oder auffällige Stellen zu verifizieren. Der Schlüssel zur Schadensermittlung liegt dabei in der Kombination physikalisch voneinander unabhängiger Methoden, um eine hohe Aussagequalität zu erreichen und mögliche verfahrens- oder gerätetechnische Fehler zu reduzieren oder ganz auszublenden. Das Ergebnis derartiger Untersuchungen ist die Bewertung des Materials und der Konstruktion, auf deren Basis die Trag- und Gebrauchstauglichkeit sichergestellt wird. Die Ermittlung von Materialreserven bei genauer Erfassung des realen statischen Systems ist das verantwortungsvolle Ziel ingenieurtechnischer Tragwerksuntersuchungen. So kann beispielsweise die Rohdichte eines 300 Jahre alten Kiefern balkens gegenüber Neuholz deutlich höher liegen und damit bei der Nachsortierung immense Sicherheitsreserven aufweisen.

Die Verwendung zerstörungsfreier und zerstörungsarmer Verfahren setzt die Kenntnis des Werkstoffes mit seinen anatomischen Besonderheiten und den gerätetechnischen Einflüssen auf das Messergebnis voraus. Die grundlegende Erforschung neuer Prüfverfahren und deren Anwendungsspezifika sind daher von essentieller Bedeutung. Erst auf dieser Basis ist eine verlässliche Praxisanwendung möglich. Mit der vorliegenden Arbeit soll von den Grundlagenuntersuchungen mit dem Ultraschallecho- und Bohrwiderstandsverfahren ein Bogen zur praktischen Anwendung gespannt werden. Dabei erfolgt eine Verknüpfung beider Verfahren mit bekannten visuellen Methoden und Festigkeitsuntersuchungen an Kleinprüfkörpern sowie an Bauteilen in Originalabmessung, um für ungeschädigte und geschädigte Althölzer Festigkeitswerte abzuschätzen.

2 Ziel der Untersuchungen und Aufbau der Arbeit

Bei der Bewertung der Tragfähigkeit einer bestehenden Konstruktion ist die Kenntnis geometrischer und baustoffspezifischer Kennwerte erforderlich.

Neuere Arbeiten, z. B. in [Tobisch und Mittag, 1998], [Hasenstab et al., 2006], [Hasenstab, 2006], [Hasenstab (1), 2007], [von Laar, 2006], [Hasenstab et al., 2007], haben gezeigt, dass gerade die zerstörungsfreien und -armen Prüfverfahren eine wertvolle Hilfe bei der Untersuchung von Holz darstellen können.

Seit mehreren Jahren ist die Bohrwiderstandsmessung zur quantitativen Bestimmung von Querschnittsgeometrien und qualitativen Baustoffbewertung im Einsatz und erst seit wenigen Jahren werden Untersuchungen mit Hilfe des Ultraschallechoverfahrens an Holz durchgeführt. Ein großer Teil bisheriger Prüfergebnisse des Ultraschallecho- und Bohrwiderstandsverfahrens beruht auf Vergleichsmessungen am Objekt, so dass die Datenbasis nicht oder nur eingeschränkt auf andere Anwendungen übertragbar ist. Sind kulturhistorisch wertvolle tragende Holzbauteile durch Pilzbefall geschädigt, besteht im Einzelfall die Möglichkeit, von einem Austausch gemäß DIN 68800 abzusehen. Hierzu existieren keine verwertbaren Daten, die Auskunft über die verbleibende Tragfähigkeit des geschädigten Holzbauteiles liefern.

Das **Hauptziel** der Arbeit besteht darin, Wege für eine Festigkeitsabschätzung geschädigter Hölzer zu finden.

Dafür ist es erforderlich, mobile und praxisnahe Untersuchungsverfahren so zu modifizieren und die Grenzen der Verfahren selbst so auszuloten, dass sie den gestellten hohen Anforderungen zur direkten oder indirekten Festigkeitsabschätzung gerecht werden. Das Ultraschallecho- und das Bohrwiderstandsverfahren wurden einerseits aufgrund der Mobilität beim Einsatz vor Ort sowie der guten Praxiserfahrungen ausgewählt. Andererseits wurde ein hohes Potenzial für den Einsatz als unterstützende Untersuchungsverfahren erwartet.

Prinzipiell sollen dabei Erkenntnisse aus den Untersuchungen an Kleinprüfkörpern unter Berücksichtigung der Einflüsse von Inhomogenitäten auf das Bauteil in Originalabmessungen übertragen werden.

Das Hauptziel soll durch die Bearbeitung der folgenden Teilaufgaben erreicht werden.

- Bei den hier durchgeführten zerstörungsfreien und zerstörungsfreien Untersuchungen soll ein Bezug auf ausgewählte festigkeitsrelevante Parameter hergestellt werden, um bei der Bewertung bestehender Konstruktionen Aussagen zu den Bemessungsansätzen geben zu können. Dafür müssen grundlegende Erkenntnisse in Bezug auf die ausgewählten Prüfverfahren gewonnen werden, um fehlende Basisdaten hinsichtlich des Einflusses der Holzart, der Rohdichte, des Radial- und Tangentialanteils oder der Feuchtigkeit zu erhalten.
- Das zerstörungsfreie Ultraschallechoverfahren liefert unmittelbar Daten, die zur Auswertung herangezogen werden können. Sind Konstruktionen nur beschränkt einsehbar und sollen Kriterien einer Nachsortierung überprüft werden, erscheint ein solches Verfahren geeignet, insbesondere Äste und Risse als wesentliche Sortierkriterien ermitteln zu können. Die Grenzen der Erkennung von Größe und Ausdehnung der Inhomogenitäten sollen überprüft werden.

- Zur Lösung der gestellten Aufgabe ist es erforderlich, holzanatomische und -physikalische Einflüsse zur Abschätzung der Schallgeschwindigkeit von Transversalwellen grundlegend zu ermitteln, da die hierzu veröffentlichten Daten sehr lückenhaft sind.
- Ungeklärt war bisher die Frage, ab welchem Maß der Schädigung durch holzerstörende Pilze eine Detektion erfolgt und ob es Unterschiede zwischen den gewählten Prüfverfahren gibt. Diese Problematik soll an intaktem und geschädigtem Altholz differenziert untersucht und diskutiert werden.
- Die Untersuchungen mit Ultraschallecho und Bohrwiderstand erzeugen Messsignale, die eine digitale Weiterverarbeitung erlauben. Im Rahmen der Arbeit wird versucht, neue und in der Praxis anwendbare Auswertungsalgorithmen zu entwickeln. Ziel ist dabei eine visuelle Auswertung auf Basis der Signalamplituden.
- Bereits bei frühen Befallsstadien durch Braunfäulepilze sinken die Festigkeitskennwerte rapide ab, so dass bei kaum wahrnehmbaren äußeren Anzeichen einer Schädigung bereits mit starken Beeinträchtigungen der Tragfähigkeit gerechnet werden muss. Wie genau sich Festigkeiten der Übergangsbereiche von geschädigtem zu ungeschädigtem Holz verändern, soll überprüft und bewertet werden.
- Die geschädigten Balkenquerschnitte sind durch die Zerstörung sehr unregelmäßig und unsymmetrisch, so dass der klassische Querschnittsansatz bei der zerstörenden Prüfung unrealistisch erscheint. Es sollen Wege gefunden werden, eine genauere Beschreibung zu liefern.
- Mehrere Balken sollen zerstörend geprüft und zur Herstellung von Kleinprüfkörpern genutzt werden, so dass durch eine geeignete Kombination von Abbildungsverfahren eine Lösung zur Reproduzierbarkeit der Querbalken entwickelt werden muss. Informationen des ursprünglichen Gesamtbauteils sollen auch nach dem Bruch oder dem Zersägen zur Verfügung stehen.
- Durch die Annahme, dass die gewählten Verfahren für die Bewertung bestehender Konstruktionen eingesetzt werden können, soll unter Einbeziehung dieser und anderer relevanter Kenngrößen die Tragfähigkeit pilzgeschädigter Balken in Bezug auf die Biegefestigkeit und den Biege-E-Modul eingeschätzt werden.

Aus den Zielstellungen der Arbeit ergibt sich der folgende **Aufbau**:

In Kapitel 3 werden ausgewählte Kapitel des Werkstoffs Holz und Beeinträchtigungen des Baustoffes durch holzerstörende Pilze dargestellt. Bei der Material- und Schadensbeschreibung ist die Darstellung von Altholzeigenschaften ein wesentlicher Bestandteil. So lassen sich Folgerungen schlüssig nachvollziehen.

Die Festigkeit und Elastizität von Altholz wird im Kapitel 4 beschrieben und auf mögliche Einflüsse von Schädigungen durch holzerstörende Pilze eingegangen.

Die im Rahmen der Arbeit verwendeten Ultraschallecho- und Bohrwiderstandsverfahren werden in Kapitel 5 dargestellt. Hierbei sind Besonderheiten der Verfahren unter Berücksichtigung der Inhomogenität des Holzes von Bedeutung. Zum besseren Verständnis des Ultraschallechoverfahrens wurden physikalische Grundlagen eingearbeitet.

In Kapitel 6 werden die durchgeführten Untersuchungen beschrieben und ausgewertet. Die entwickelten methodischen Ansätze zur Dokumentation, Umsetzung und Beurteilung sind den Untersuchungsergebnissen jeweils vorangestellt. Bei der Ergebnisauswertung wird einleitend der Bezug zu den technischen Kennwerten hergestellt, um Tendenzen und Abhängigkeiten der Messwerte zu erkennen, die sich direkt aus der Rohdichte oder dem Feuchtegehalt ergeben.

Eine Zusammenfassung aller aus den Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse erfolgt im Kapitel 7.

Die Ergebnisse der Einzeluntersuchungen werden in Kapitel 8 zusammengeführt und mittels Regressionsanalyse der Einfluss einer oder mehrerer unabhängiger Variablen auf die Abschätzung von Festigkeitskennwerten untersucht.

Abschließend werden die wichtigsten Ergebnisse und Schlussfolgerungen im Kapitel 9 zusammengefasst und für die weitere praktische Anwendung ein Ausblick gegeben.

Im Anhang sind neben den verwendeten Formeln die Messergebnisse vollständig und detailliert enthalten. Zudem wurden in den Anhang vorbereitende und zusätzliche Untersuchungen aufgenommen, deren Darstellung den Hauptteil der Arbeit ergänzt.

3 Der Werkstoff Holz und dessen Schädigungen durch Pilze

3.1 Holzkundliche Grundlagen (Kapitelauswahl)

3.1.1 Anatomie des Holzes

3.1.1.1 Makroskopischer Aufbau

3.1.1.1.1 Allgemeiner Aufbau

Der Baum besteht aus dem Wurzel-, Stamm- und Kronenbereich. Je nach Standort und Baumart dienen verschiedene Wurzelarten (z. B. Flach-, Herz- oder Tiefwurzel) der Wasser- und Mineralienaufnahmen sowie der Verankerung im Untergrund. Der Stamm ist der bauwirtschaftlich interessante Teil des Baumes. Insbesondere der untere Stammabschnitt (Schaft) ist aufgrund der Querschnittsgröße und der im Vergleich zum oberen Stammabschnitt (Zopf) geringeren Ästigkeit gefragt.

Durch geregelten Forstbau kann die Holzqualität durch gezielte Peripherpflanzungen und Freischnitt beeinflusst werden. Die Baumkrone dient durch das chlorophyllhaltige Blattwerk der Bildung von lebensnotwendigem Traubenzucker, aus dem u. a. neue Holzzellen gebildet werden.

Einzelne Bereiche des Stammquerschnitts können mit bloßem Auge unterschieden werden.

Der Stammquerschnitt gliedert sich in:

- die Markröhre,
- das Kern- und Splintholz,
- das Kambium und
- die Rinde mit an das Kambium anliegender Bastschicht sowie der äußeren Borke.

Die Mitte der Sprossachse ist die Markröhre und erscheint im Querschnitt meist rund. Sie kann aber beispielsweise auch eckig (*Populus* spp.) oder strahlig (*Quercus* spp.) ausgebildet sein.

Bei Farbkernhölzern kann optisch gut zwischen dem Kern- und Splintbereich unterschieden werden. Durch fehlende Einlagerung pigmentierter Substanzen bei der Kernbildung ist das bei den so genannten Reifhölzern nicht möglich. Splinthölzer (Hölzer mit verzögerter Kernholzbildung) bilden meist keinen Kern aus.

Das Kambium zwischen Splintholz und Bastschicht bestimmt den Dicken- und Längenzuwachs des Baumes. Dessen Aktivität wird in der gemäßigten Klimazone durch den jahreszeitlichen Wechsel bestimmt und führt zur Bildung der Jahrringe.

Die Bastzone dient der Versorgung des Kambiums mit den bei der Photosynthese gebildeten Einfachzuckern. Den äußeren Stammabschluss bildet die Borke.

Im Folgenden wird kurz auf Jahrringe und Äste eingegangen. Diese und weitere für Holz typische Inhomogenitäten sind wichtige Kriterien bei der visuellen Sortierung. Bei der visuellen Sortierung wird eine Einstufung in die Klassen S 7, S 10 und S 13 vorgenommen, die die Basis für die Bewertung der Tragfähigkeit darstellt.

3.1.1.1.2 Jahrringe

Die Jahrringbreite beeinflusst insbesondere bei Nadelhölzern und ring- und halbringporigen Laubhölzern die Rohdichte und somit die Festigkeitseigenschaften. Früh- und Spätholzanteile weisen allein genommen bereits starke Rohdichteunterschiede auf. So kann beispielsweise das Spätholz von Pitch pine (harzreiche Importkiefer) eine Rohdichte erreichen, die der dreifachen des Frühholzes entspricht.

Die Jahrringbreite variiert zudem

- radialsymmetrisch über den Querschnitt (marknah mit großer Breite, adulte Bereiche mit geringer Breite),
- in der Stammhöhe und
- in der Himmelsrichtung über den Querschnitt und die Stammhöhe.

Unter rauen klimatischen Bedingungen gebildetes Nadelholz ist besser technisch nutzbar als solches, das aufgrund eines besseren Wasser- und Nährstoffangebotes und milderem Klimas breite Frühholzanteile bilden konnte. Insbesondere Fichte neigt dahingehend zur Weitringigkeit. Ausgehend davon, dass der Spätholzanteil konstant bleibt und ein Nadelbaum auf wechselnde klimatische Verhältnisse durch die Variation der Frühholzzone reagiert, kommt es bei sehr schmalen Jahrringen nicht zur vollständigen Ausbildung der Spätholzzone. So nimmt ab der Grenze von etwa 1,0 mm mit steigender Jahrringbreite die Rohdichte ab. Zwischen durchschnittlicher Jahrringbreite und Rohdichte für Kiefer (in [Nier, 1994] Auswertung von 1295 Proben), Fichte (1822 Proben) und Tanne (511 Proben) wurde für Nadelhölzer ein Zusammenhang festgestellt. Danach ist zunächst bei sehr schmalen, engen Jahrringen < 1,0 mm bei zunehmender Jahrringbreite ein Anstieg der Rohdichte zu verzeichnen, wenn auch bei starker Streuung der Serien. Mit Ansteigen des Jahrringes auf eine erforderliche Mindestbreite wird zunächst die Spätholzzone vervollständigt und dann die Frühholzzone variiert.

Baupraktisch relevant erscheint ohnehin nur die Abnahme der Rohdichte mit zunehmender Jahrringbreite über 1,0 mm. Hinzu kommt, dass die marknahen juvenilen Jahrringe, deren Zellen etwa 50 % kürzer sind, lediglich 14 % - 25 % der Steifigkeit der Normaltracheiden besitzen [Kucera, 1973].

Unter dem Aspekt der Zunahme der Juvenilringe in Richtung Krone und des höheren Anteils adulter enger Jahrringe der Stammbasis nimmt die Festigkeit von Probekörpern mit zunehmender Stammhöhe ab.

Altholz. Nach [Lißner und Rug, 2005] und [Deppe und Rühl, 1993] hat die Jahrringbreite bei untersuchten Althölzern keinen Einfluss auf die festgestellte Streubreite der Rohdichte, so dass der vorgenannte Bezug auf die Festigkeiten genauso gilt.

In der Praxis der Nachsortierung vor Ort ist es durch Einbausituationen nicht immer einfach, die Jahrringbreite direkt zu ermitteln. Im Bedarfsfall helfen zerstörungsarme Verfahren oder eine Bohrkernentnahme weiter, wenn die Ermittlung der mittleren Jahrringbreite durchgeführt werden soll (Abb. 2).

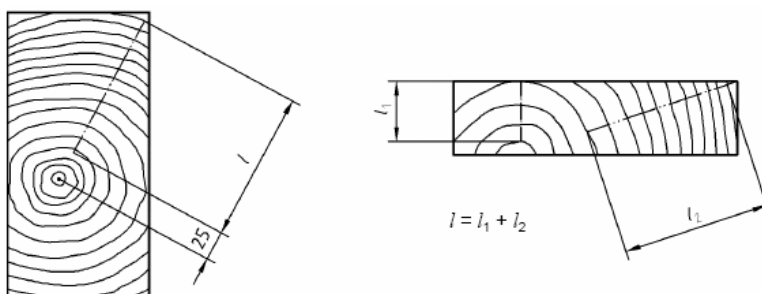


Abb. 2: Ermittlung der mittleren Jahrringbreite bei Kanthölzern und Bohlen nach DIN 4074-1

3.1.1.1.3 Äste

Äste sind ein wichtiges Kriterium bei der Festlegung der Güte des Holzes. Dabei entscheidet die Astgröße bei Einzelästen, bei Astansammlungen die Summe der kleineren Einzeläste, über die Einstufung in eine Sortierklasse nach DIN 4074-1 (Abb. 3) und daraus abgeleitet in eine Festigkeitsklasse gemäß DIN EN 338.

Während des Juvenilwachstums werden von der Markröhre ausgehend Äste initiiert, die schräg oder horizontal austreiben. Die Anlage des Kambiums erfolgt um die Äste ebenso, wie bei dem Hauptstamm mit der Bildung neuer Jahresringe.

Im Anschluss des Astes an den Hauptstamm wechselt somit die Faserrichtung gemäß der kambialen Orientierung und betrifft die umgebenden Bereiche im Stamm unter der Maßgabe der Optimierung der Normalspannungen [Mattheck, 1997]. Der fest verwachsene Ast wird als Weißast bezeichnet. Abgebrochene Äste („Abschiedskragen“), die vom Hauptstammholz umwallt und damit eingeschlossen wurde, werden als Schwarzäste bezeichnet.

Äste besitzen im Zugbereich die größte nachteilige Wirkung auf das Tragverhalten des Bauteiles. Bei Biegeträgern mit Ästen im Zugbereich führt das zur Verringerung der Biegefestigkeit durch die Abnahme der Zugfestigkeit. Äste können die Bruchspannung und damit die Dauerstandsfestigkeit um bis zu 60 % reduzieren [Kollmann, 1952]. Im Druckbereich wird der Ast zwar in der schwächeren Richtung senkrecht zur Faser auf Druck belastet, die im Allgemeinen jedoch höhere Rohdichte bewirkt auch eine Versteifung des Bereiches und damit eine Erhöhung der Druckfestigkeit rechtwinklig zur Faser. Bei der Beanspruchung auf Schub durch Querkraft im Auflager- oder Stützenbereich ist kaum ein Einfluss zu verzeichnen [Ehlbeck und Görlacher, 1993].

Altholz. Die Voraussage der zu erwartenden Festigkeit von Bauteilen im Bestand hängt ganz wesentlich von der Ästigkeit ab. Eine hohe Rohdichte führt bei hoher Ästigkeit nicht zu den aus der Rohdichte abgeleiteten Werten, da an Stellen großer Äste das Versagen eintritt. Nach [Winter und Held, 1996] beträgt der Korrelationskoeffizient der vorhandenen Holzfestigkeit in Bezug auf die ermittelte Rohdichte und Ästigkeit 0,7 - 0,8 und bei einer alleinigen visuellen Sortierung lediglich etwa 0,5. Besonders Nadelholzbalken im Bestand besitzen wegen der meist vorhandenen Markröhre in Querschnittsmittle von dieser ausgehende Astquirle. Je nach Alter und Bedeutung des Bauwerkes wurden solche strukturellen Nachteile durch großzügige Dimensionierung ausgeglichen.

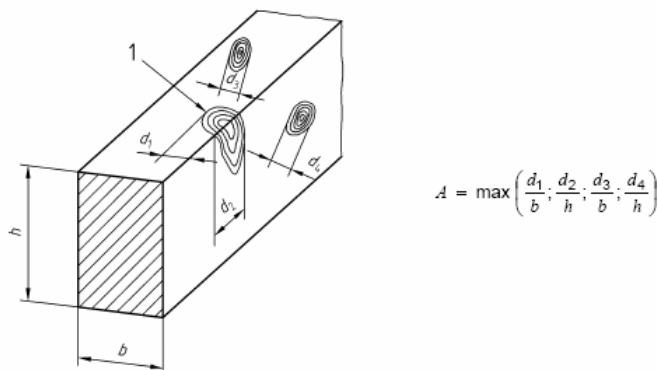


Abb. 3: Astmaße und Ermittlung der Ästigkeit nach DIN 4074-1

3.1.1.2 Mikroskopischer und Submikroskopischer Aufbau

3.1.1.2.1 Zellarten

Die Unterschiede zwischen Nadel- und Laubholz ergeben sich aus den unterschiedlichen Zellarten sowie deren Größe und Anordnung.

Nadelholz besteht zu 90 - 95 % aus Tracheiden [Wagenführ und Scholz, 2008], die überwiegend axial verlaufen. Je nach jahreszeitlichen Wuchsbedingungen werden innerhalb dieser Zellen unterschiedliche Flüssigkeitsmengen in die Baumkrone transportiert. Die Transportmenge bestimmt den bereit zu stellenden Transportraum, so dass die Frühholztracheiden durch die großen Lumina eine poröse Holzstruktur und die Spätholztracheiden durch kleinere Lumina und dafür größerer Wandstärke eine dichte und tragfähigere Struktur bilden. Für die Nährstoffleitung und -speicherung werden Parenchymzellen, in einigen Fällen auch Quertracheiden gebildet, die das Holz als schmale radiale Bänder (Holzstrahlen) durchziehen. In axiale Richtung orientierte Speicherzellen sind als Längsparenchym nicht bei allen Nadelhölzern vorhanden. Die parenchymatischen Zellen sind im Splint während des Wachstums aktiv und maßgeblich an der Kernbildung beteiligt. Mit der jahringweisen Erweiterung der Kernzone sterben sie schließlich ab.

Im Laubholz wird der Flüssigkeitstransport durch die großlumigen Tracheen (auch Gefäße, Poren) sichergestellt. Phylogenetisch entwickelten sie sich aus den Frühholztracheiden der Nadelhölzer, mit dem Unterschied, dass die Zellsegmente übereinander angeordnet und die gemeinsamen Kontaktflächen an dem oberen bzw. unteren Ende durchbrochen sind. Ob diese Auflösung einfach, leiterförmig oder mit ovalen bzw. kreisförmigen Durchbrüchen ausgebildet ist, hängt von der Holzart ab und dient u. a. der mikroskopischen Holzartenbestimmung. Die so entstandenen mehrere Meter langen durchgängigen Röhren können schneller mehr Flüssigkeit transportieren. An einem sonnigen Sommertag sind Steiggeschwindigkeiten von 50 m/h möglich, bei den Tracheiden nur 5 m/h. Die Anordnung der Tracheen im Querschnitt ist charakteristisch für die Gattungen bzw. Holzarten, die danach in Ring-, Halbring- und Zerstreutporer eingeteilt werden.

Das Festigkeitsgewebe besteht aus den Libriformfasern, die die Grundsubstanz beim Laubholz darstellen, in die alle anderen Zelltypen eingebettet sind. Die Libriformfasern des Laubholzes sind mit 1000 - 1500 µm kürzer als die Spätholztracheiden des Nadelholzes. Die Tracheiden können bis 5000 µm lang sein [Wagenführ und Scholz, 2008].

Die Nährstoffleitung und -speicherung wird auch beim Laubholz von den parenchymatischen Zellen übernommen. Deren Vorkommen und Anordnung ist im Vergleich zu den Nadelhölzern weitaus variabler. Bei vielen Laubholzarten sind die Holzstrahlen durch mehrreihig nebeneinander und mehrstöckig übereinander liegende radiale Parenchymstränge mit bloßem Auge zu erkennen. Das Strahlen- und Längsparenchym ist bei vielen Laubholzarten durch dessen gehäuftes Auftreten charakteristisch und bestimmt die Textur des Holzes. Aus den Geweben werden der Holzkörper bzw. der Stamm und die Äste gebildet.

3.1.1.2.2 Zellwand

Die Zellwand ist aus einzelnen Schichten mit unterschiedlicher Orientierung der Zellulosefibrillen, aber auch unterschiedlichen Anteilen an Holozellulose und Lignin aufgebaut. Aneinander grenzende Zellen besitzen die gemeinsame Mittellamelle, die mit den enthaltenen hohen Anteilen an Lignin und Hemicellulosen Kittfunktion ausübt und für einen guten Verbund der einzelnen Zellen sorgt. Insbesondere bei der Bruchschlagfestigkeit hat diese

Schicht größte Bedeutung [Wegelin, 1953], da hierbei das Versagen durch Aufreißen der Mittellamelle gekennzeichnet ist. Auftretende Beanspruchungen werden von der einen auf die benachbarte Zelle übertragen, so dass der Größe der Kontaktfläche zwischen den Zellen besondere Bedeutung zukommt. Je Volumeneinheit ist diese umso größer, je kleiner die Einzelzelle ist, denn die auftretenden Kräfte können auf eine größere Fläche verteilt werden und die resultierende Spannung sinkt. Die Mittellamelle ist etwas dicker im Spätholz und die Zellen etwas kleiner ausgebildet und bedingt damit höhere Festigkeiten durch Verbesserung der Querkraftübertragung [Wagenführ, 1980].

An die Mittellamelle schließt sich die nur 0,15 µm dünne Primärwand an.

Die für die Festigkeit bedeutsame Schicht innerhalb der gesamten Zellwand ist die Sekundärwand (S) mit drei Einzellagen (S_1 bis S_3). Die Schicht S_1 kann ihrerseits aus 3 - 6 Einzellamellen bestehen. Die Orientierung der Fibrillen innerhalb der Schicht beträgt 60 - 80° zur Zellachse mit lockerer Streu- und Schraubentextur. Die S_1 -Schicht umschließt die S_2 -Schicht wie ein Mantel, der durch die Fibrillentextur eine Art Karkasse darstellt. Die sich anschließende S_2 -Schicht macht 75 - 85 % des gesamten Wandquerschnitts mit einer Dicke von 1 - 10 µm aus [Riedel und Zimmermann, 2001]. Der Steigungswinkel der parallelen, eng gepackten und schraubig angeordneten Fibrillen zur Zellachse beträgt zwischen 5° und 30°. Diese Schicht ist aus weiteren 20 - 30 bei Frühholz- und bis zu 150 Mikrolamellen bei Nadelholzzellen (Tracheiden) im Spätholz aufgebaut. Der Fibrillenverlauf des Frühholzes in Bezug auf die Zellachse verläuft bei Nadelholz in einem größeren Winkel als der des Spätholzes [Wagenführ, 1980]. Die Festigkeitswerte der Spätholztracheiden sind durch Synergie der geringeren Tracheidenlänge, einer stärkeren Zellwand und dem fast achsparalen Fibrillenwinkel bedeutend höher [Booker und Sell, 1998]. Die sich an die S_2 -Schicht anschließende Tertiärwand (S_3) bildet den inneren Abschluss der röhrenartigen Holzzellen und ist damit auch für den Schutz der Tragstruktur verantwortlich. Die Fibrillenorientierung beträgt 60 - 80° zur Zellachse und hat eine parallele Schraubentextur.

Zwischen den genannten Schichten existieren Lamellen mit übergehender fibrillärer Ausrichtung.

Innerhalb der Zellwand bestehen aufgrund der Lamellierung Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung. In Abb. 4 ist eine Holzzelle mit dem Gehalt an Zellulose, Hemizellulosen und Lignin dargestellt. Von der Mittellamelle beginnend ist eine Zunahme des Zellulosegehaltes bei Reduzierung des Ligningehaltes deutlich. Den Hauptanteil an Zellulose findet man in der Sekundärwand, jenem Wandabschnitt, der für die mechanisch-physikalischen Eigenschaften am bedeutsamsten ist. Der Hauptanteil des Gesamtgehaltes an Lignin ist bei Laub- und Nadelhölzern in der Mittellamelle, einschließlich der Interzellularen und der Primärwand zu finden. Einschränkung ist zu ergänzen, dass zum Teil gegenläufige Konzentrationsunterschiede der Zellwandschichten des Früh- und Spätholzes auftreten [Wagenführ und Scholz, 2008].

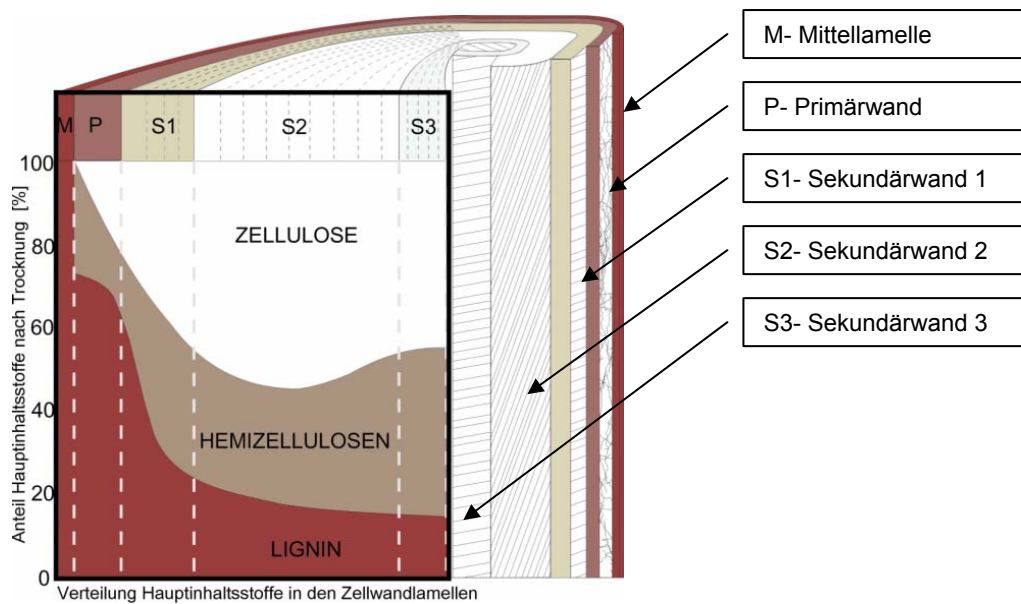


Abb. 4: Holzzelle, schematische Darstellung mit Verteilung der Hauptbestandteile in den einzelnen Zellwandschichten nach [Fengel und Wegener, 1989], [Hoadley, 1990], [Holz-Lexikon Bd.1, 1988], [Holz-Lexikon Bd.2, 1988], [Wagenführ, 2007]

3.1.2 Chemie des Holzes

3.1.2.1 Hauptbestandteile

Die komplexen Strukturen der Haupt- und Nebenbestandteile des Holzes sind aus den Elementen Kohlenstoff, Sauerstoff, Wasserstoff und Stickstoff und den in geringen Mengen enthaltenen Metallen und Spurenelementen aufgebaut.

Die Hauptbestandteile werden in Holozellulose (Zellulose und Hemizellulosen) und Lignin eingeteilt.

3.1.2.1.1 Zellulose

Der Aufbau beruht für die organischen Glycoside auf den bei der Photosynthese gebildeten Zuckermonomeren. Die Zellulose ist ein hauptsächlich aus polymerisierten Glukosemolekülen $[(C_6H_{12}O_6)_n]$ aufgebautes Makromolekül mit einem hohen Polymerisationsgrad als Maß der Kristallinität (β -1,4-glycosidische Bindung). Zellulose ist zu etwa 43 - 46 % im Holz der gemäßigten Klimazone enthalten [Wagenführ und Scholz, 2008]. Die atomare Bindung ermöglicht die sehr gute Beanspruchung in Richtung der Polymerachse und bestimmt im Wesentlichen die Zugfestigkeit. Aus einzelnen hochkristallinen Zelluloseketten entstehen durch Bündelung aufgrund der Selbstaggregation nach chemischen Gesetzen Elementarfibrillen und daraus Mikrofibrillen [Wagenführ und Scholz, 2008]. Die nebeneinander liegenden Zelluloseketten sind untereinander über Nebenvalenzbindungen (Van-der-Waals'sche Bindungskräfte, Wasserstoffbrücken) verknüpft. Sauerstoff und Wasserstoff besitzen eine unterschiedliche Elektronegativität und dadurch eine unterschiedliche und unsymmetrische Bindung (Dipolbindung). Durch diese Pole existieren Anziehungskräfte zwischen Molekülen, was im Allgemeinen unter Wasserstoffbrückenbindung verstanden wird. Diese Nebenvalenzbindungen existieren zwischen Zellulose und Zellulose sowie zwischen Wasser und Zellulose. An den Enden der langen Glucanketten geht die Struktur in ungeordnete, wenig orientierte parakristalline hemizelluläre Bereiche über. Diese auch als

„Fransen“ bezeichneten Enden stellen durch deren amorphe Struktur die Zonen primärer chemischer Reaktionen, aber auch hygroskopisch aktive Bereiche dar. Die Wasserstoffbrückenbindungen der Zellulose sowie die Hemizellulosen bestimmen ganz entscheidend die Hygroskopizität und damit das Quellen und Schwinden (Arbeiten) des Holzes.

Altholz. Die Frage nach der Veränderung des Gehalts an Zellulose mit zunehmendem Holzalter wird in der Literatur widersprüchlich beantwortet. Nach [Holz, 1981] ändert sich der Zellulosegehalt mit zunehmendem Holzalter von Fichte nicht. Dagegen wird in [Hoferichter und Wehle, 1993] ein sinkender Zelluloseanteil festgestellt. Bei der Untersuchung an Hölzern japanischer Tempelanlagen im Jahr 1955 wurde eine Abnahme der Rohdichte und der Festigkeit durch Oxidation der Zellulose ermittelt, so dass die dabei eintretende Versprödung der Zellwände zur Abnahme einiger Festigkeitskennwerte führt [Nier, 1994].

3.1.2.1.2 Hemizellulosen

Die Hemizellulosen stellen die amorphen Bereiche innerhalb der Mikrostruktur der Holzzelle dar und stehen in enger Verbindung mit der Zellulose. Sie sind mit kurzen Seitenketten verzweigt und besitzen einen weitaus geringeren Polymerisationsgrad als die Zellulose. Die weite Verzweigung erhöht die Bindungskraft des Lignins an die Hemizellulosen und damit an die Zellulose. Die Einzelbausteine der Hemizellulosen sind insbesondere Xylose und Mannose, außerdem Galactose, Glucose, Arabinose sowie Uronsäure in verschiedenen Anteilen und hohem Variationsgrad.

Je nach Holzart liegt der Gehalt an Hemizellulosen zwischen 27 - 37 % [Wagenführ und Scholz, 2008]. Die chemische Zusammensetzung variiert bei Nadel- und Laubhölzern. Die offene Struktur der Hemizellulosen wird durch eine Vielzahl von Seitengruppen bestimmt, deren OH-Gruppen durch Wasserstoffbrücken weniger belegt und daher besonders hygroskopisch aktiv sind. Diese hydrophilen Eigenschaften bestimmen daher das Quellen und Schwinden des Holzes.

Altholz. Nach chemischer Analyse in [Hoferichter und Wehle, 1993] bestehen Hinweise darauf, dass mit zunehmendem Alter eine Zunahme des Anteils der Hemizellulosen zu verzeichnen ist. Es kann vermutet werden, dass Versprödungseffekte aufgrund der nachlassenden Stabilität und mit steigender Komplexität der organischen Verbindung zum Aufspalten der Zellulose in kleinere Bruchstücke führt.

3.1.2.1.3 Lignin

Lignin (lat. *lignum* = Holz) schließt den Prozess der Verholzung durch das Einbetten der Zellulose und der Hemizellulosen ab. Durch dieses Gefüge entsteht ein Verbundbaustoff, der dem Stahlbeton ähnlich ist. Die Komponente Zellulose bestimmt die Zugfestigkeit, die Komponente Lignin die Druckfestigkeit und zum Teil die viskoelastischen Eigenschaften. Fällt eine Komponente der Hauptinhaltsstoffe aus bzw. wird durch spezialisierte Pilze enzymatisch aufgespaltet, führt das zum Verbundversagen. Grundsätzlich ist Lignin aus Phenylpropanoiden sehr komplex und variabel hinsichtlich der Molekülgröße und des Polymerisationsgrades aufgebaut und die Bildung des Ligninmakromoleküls aus den monomeren alkoholischen Vorstufen teilweise umstritten [Wagenführ und Scholz, 2008]. Zwischen einzelnen Makromolekülen werden Etherverbindungen oder

Kohlenstoff-Kohlenstoff-Verbindungen geknüpft, die unterschiedliche Löslichkeiten in Basen oder Säuren bedingen und bei der Zellstoffgewinnung eine Rolle spielen. Dabei anfallendes Lignin dient als Bindemittelkomponente bei der Herstellung von Holzwerkstoffen und Klebemitteln oder wird auch direkt oder indirekt energetisch genutzt.

Der Anteil an Lignin beträgt 20 - 27 %. Aber auch hier bestehen charakteristische Unterschiede zwischen den Holzarten. Nadelhölzer gelten in der gemäßigten Zone als ligninreich ($\approx 27\%$), Laubhölzer enthalten deutlich weniger Lignin ($\approx 21\%$) [Wagenführ und Scholz, 2008]. Bei chemischem Angriff starker Säuren oder Basen kann Lignin gelöst werden und führt zur Mazeration. Insbesondere starke Oxidationsmittel wie Chlor, Chlordioxid oder Kaliumpermanganat greifen das Lignin und langfristig auch die Polysaccharide an. Der Abbau erfolgt umso eher und intensiver, je höher die Konzentration und die Temperatur der angreifenden Substanz sind.

Altholz. Der Ligningehalt ändert sich mit zunehmendem Holzalter nicht [Holz, 1981], [Hoferichter und Wehle, 1993].

3.1.2.2 Nebenbestandteile

Man unterscheidet zwischen primären Nebenbestandteilen, die während des Wachstums des Baumes gebildet werden und für die Lebens- und Wachstumsfunktionen erforderlich sind und sekundären Nebenbestandteilen, die insbesondere im Zuge der Kernbildung eingelagert werden.

Zu den primären Nebenbestandteilen werden Zucker, Fett, Eiweiß oder Stärke gezählt. Sekundäre Inhaltsstoffe werden im Kernholz innerhalb der Zelllumina, in den Thyllen des Laubholzes oder interzellularen Hohlräumen eingelagert und bestimmen die Farbe, den Geruch aber auch die Dauerhaftigkeit der Holzarten. Zu denen gehören

- Chinone [Tectochinon z. B. bei Teak (*Tectona grandis* L. f.), insektizid (auch Isoptera) und fungizid],
- Stilbene [Chloropherin z. B. bei Iroko (*Chlorophora excelsa* Bent. & Hook. f.)],
- Tropolone [(Thujapizin z. B. bei Western Red Cedar (*Thuja plicata* D. Don) insektizid und fungizid],
- Hydroxystilbene [Pinosylvin z. B. bei Kiefer (*Pinus sylvestris* L.) bakterizid, insektizid und fungizid],
- Brasilin [insektizid (auch Isoptera)] oder auch
- Tannine [Gerbstoffe z. B. bei Stieleiche (*Quercus robur* L.) insektizid und fungizid].

Innerhalb des Kerns ist es möglich, dass ein Konzentrationsgefälle an Fungiziden und Insektiziden vom splintnahen Bereich in Richtung Markröhre existiert [Wagenführ und Scholz, 2008], so dass damit auch eine Innenfäule an stehenden Bäumen mit üblicherweise guter Dauerhaftigkeit zu erklären ist [z. B. Innenfäule im Juvenilbereich von Robinie (*Robinia pseudoacacia* L.)].

Altholz. Insbesondere primäre Nebenbestandteile sind einem zeitlich bedingten Verfall unterlegen. Beispielsweise resultiert ein stark sinkendes Neubefallsrisiko von altem Nadelholzsplint durch Hausbock (*Hylotrupes bajulus* L.) daraus, dass sich der Gehalt an Eiweißen und Vitaminen (insbesondere Vitamin B 5) nach etwa 60 - 80 Jahren in erheblichem Maße reduziert hat.

3.1.3 Physik des Holzes

3.1.3.1 Übersicht

Die meisten physikalischen Eigenschaften des Holzes sind in Abhängigkeit von der holzspezifischen Orientierung, der axialen (parallel zur Faser, Stamm- oder Balkenrichtung), der radialen (rechtwinklig zur Faser, Richtung der Holzstrahlen) und der tangentialen Richtung (rechtwinklig zur Faser, in Richtung des Jahrringes) zu betrachten. Insbesondere im Hinblick auf die Festigkeit dominiert in axialer Richtung die C-C-Atombindung. In radialer und tangentialer Richtung bestimmen die Nebervalenzbindungen (Wasserstoffbrückenbindung, Van-der-Waals'sche Kräfte) die physikalischen Eigenschaften rechtwinklig zur Faser. Man spricht dabei von der Anisotropie des Holzes. In Tab. 1 und den folgenden Abbildungen sind einige Beispiele stellvertretend aufgeführt.

Tab. 1: Beispiele zur Anisotropie von Holz [Niemz, 1993], [Wagenführ, 2007]

Physikalische Eigenschaft				
Hygroskopische Eigenschaften	Festigkeits-/Elastizitätseigenschaften	Akustische Eigenschaften	Thermische Eigenschaften	Elektrische Eigenschaften
<ul style="list-style-type: none"> - Quellen und Schwinden - Diffusion und Trocknung - kapillare Wasseraufnahme 	<ul style="list-style-type: none"> - Zugfestigkeit - Druckfestigkeit - Biegefestigkeit - Scherfestigkeit - E-Modul und Querdehnung - Schubmodul 	<ul style="list-style-type: none"> - Schallleitfähigkeit und Schallgeschwindigkeit - Schalldämpfung und Schalldämmung 	<ul style="list-style-type: none"> - Wärmeleitfähigkeit - Wärmedehnung - Brandverhalten 	<ul style="list-style-type: none"> - Elektrischer Widerstand - Elektrische Leitfähigkeit

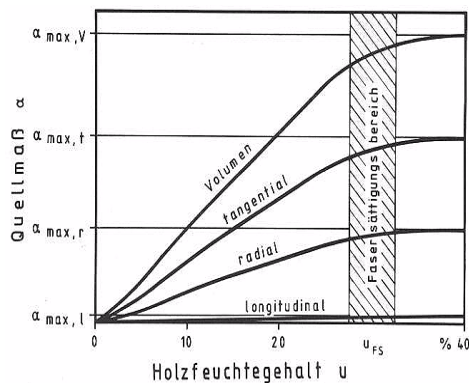


Abb. 5: Quellverhalten von Holz [Holz-Lexikon Bd.2, 1988]

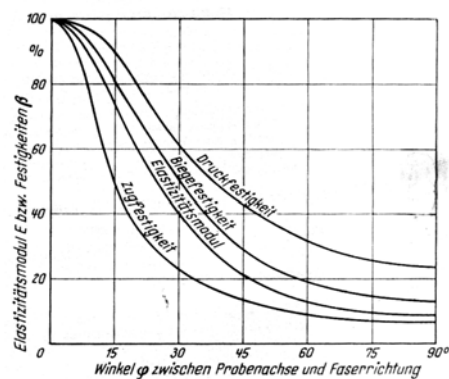


Abb. 6: Abhängigkeit einiger Festigkeits- und Elastizitätskennwerte von der Faserrichtung [Hiese, 2003]

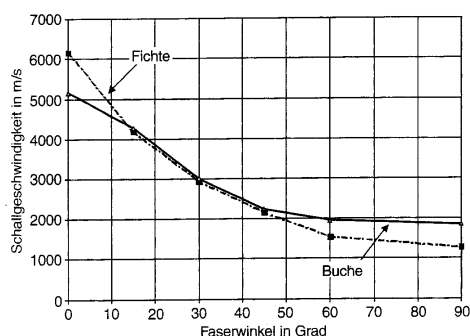


Abb. 7: Schallgeschwindigkeit (Longitudinalwellen) in Abhängigkeit von der Faserrichtung [Niemz et al., 1999]

3.1.3.2 Rohdichte

Die Holzsubstanz besteht maßgeblich aus den Zellwänden, den davon eingeschlossenen Lumina und den dort und interzellular enthaltenen Einlagerungen oder Inkrustierungen. Der Masseanteil an aktiven Zellen mit Protoplasten ist vergleichbar gering und liegt mit den Einlagerungen und Inkrustierungen zwischen 3 % und 5 %.

Die Rohdichte ist bei gesundem Holz maßgebendes Kriterium bei der Bewertung, denn alle Festigkeitseigenschaften stehen mit der Rohdichte in engem Zusammenhang. Die Rohdichteverteilungen der einheimischen Nadelnutzhölzer sind linkssteil bzw. rechtsschief [Kollmann, 1978], so dass bei der Ermittlung der Rohdichte einer Stichprobe und dem Vergleich zur Gauß'schen Normalverteilung Abweichungen der Häufigkeit berücksichtigt werden müssen.

Die Bestimmung der Rohdichte liefert in Kombination mit visuellen Sortiermerkmalen eine Festigkeitsklasse, die einer maschinellen Sortierung und damit differenzierteren Betrachtung und Einstufung entspricht. Eine derartige Festigkeitssortierung bietet die Möglichkeit, aus der pauschalen Zuordnung einen realistischen Festigkeitskennwert zur weiteren Verwendung zu ermitteln. Die Biegefestigkeit kann so bis zu 2/3 (Laubholz) bzw. bis zu 1/3 (Nadelholz) höher angenommen werden [Lißner und Rug, 2005]. Gleichzeitig reduzieren sich dabei nicht quantifizierte Sicherheiten für unzulängliche Annahmen bei der Tragwerksbemessung.

Altholz. Mit steigender Rohdichte erhöhen sich u. a. die Zug-, Druck- und Biegefestigkeit und auch der E-Modul, wobei der Einfluss der Rohdichte auf die Druckfestigkeit stärker ist als auf die Biegefestigkeit.

In [Ehlbeck und Görlacher, 1993] wurden Werte für altes Konstruktionsholz aufgeführt, die mit den Werten nach DIN 68364 verglichen wurden. Die Rohdichte der geprüften alten Nadelhölzer liegt danach unter der von Neuholz.

Nach [Lißner und Rug, 2005] war die für ungeschädigtes Holz geltende Abhängigkeit der zunehmenden Druckfestigkeit mit steigender Rohdichte aufgrund der großen Streuung (Variationskoeffizienten von 11 %) bei geprüfem Altholz nicht zu erkennen. Im Mittel wurden jedoch Werte erreicht, die im Bereich derer von frischem Holz liegen.

Dem Wachstum geschuldet, nimmt die Rohdichte mit steigender Baumhöhe ab und spiegelt sich bei langen Konstruktionshölzern im Bauwerk wider. Untersuchungen in [Glos und Schulz, 1986] belegen, dass bei der mittleren Biegefestigkeit von Balken, die aus oberen (12 - 20 m) und unteren (2 - 10 m) Stammbereichen gewonnen wurden, eine Abnahme auf bis zu 87 % der maximalen Festigkeit bei Fichte und auf bis zu 76 % bei Kiefer zu verzeichnen ist und mit jeweilig unterschiedlicher Rohdichte begründet werden kann.

3.1.3.3 Feuchtigkeitsverhalten

3.1.3.3.1 Hygroskopizität

Baustoffe und andere Materialien passen sich aufgrund ihrer Kapillarität an die Konzentrationen der umgebenden flüssigen oder gasförmigen Stoffe, so auch an Wasserdampf, durch Einstellung eines Gleichgewichts an. Die Besonderheit bei Holz besteht darin, dass die Intensität des Ausgleichs aufgrund der enthaltenen Holozellulose besonders groß ist. Man spricht hierbei von der Hygroskopizität des Holzes. Es setzt zunächst mit der Chemisorption ($\omega = 0$ % bis ω ca. 6 %) beginnend eine Bindung der Wassermoleküle mit reaktionsfähigen Hydroxylgruppen der Zellulose ein. Die kristallinen Bereiche der Zellulose besitzen abgesät-

tigte Bindungen, so dass die Chemisorption in den amorphen bzw. den parakristallinen Bereichen mit der Belegung unbesetzter endständiger OH-Gruppen stattfindet und kaum zur Quellung des Holzes führt. Eine deutliche Volumenänderung erfährt das Holz in den folgenden Stufen der Adsorption ($\omega > 6\%$ bis ω ca. 15 %) und der Kapillarkondensation ($\omega > 15\%$ bis ω ca. 30 %). Durch Van-der-Waals'sche Kräfte lagert sich Wasser auf den inneren Fibrillenoberflächen an. Im Zuge der Verdichtung der Wassermoleküle und dem Aufreißen bestehender Wasserstoffbrücken sowie durch lokal variierende Adsorptionskräfte wird eine ungleichmäßige polymolekulare Wasserschicht gebildet. Die intermolekularen Zwischenräume werden aufgeweitet. Durch die Dampfdruckdifferenz kommt es in engen Hohlräumen der Zellwand zum Niederschlag von Wasser, da der Dampfdruck in den Kapillaren geringer ist als über der freien Wasseroberfläche (Kapillarkondensation). Je enger und kleiner die Hohlräume sind, desto eher findet die Kapillarkondensation statt. Ständiger Wechsel zwischen Moleküleinlagerung und Abgabe und damit veränderter Fixierung des Holozellulosegerüsts bei Austrocknung führt zum so genannten „Arbeiten“ des Holzes. Der erhebliche Einfluss einer Änderung der Feuchtigkeit auf Festigkeitskennwerte und somit auf das Tragfähigkeitsverhalten ist in Abb. 8 dargestellt. So sinken beispielsweise mit zunehmender Feuchtigkeit die Druck- und Biegefestigkeit. Zwischen 10 % und 30 % Feuchtegehalt verringern sich auch die Zug- und Scherfestigkeit. Bei der Bemessung nach DIN 1052 wird dieser Umstand über die Definition der Nutzungsklasse und anzusetzende Korrekturfaktoren berücksichtigt. Nur auf wenige Eigenschaften, wie der Bruchschlagfestigkeit, hat die Änderung des Feuchtegehaltes kaum einen Einfluss.

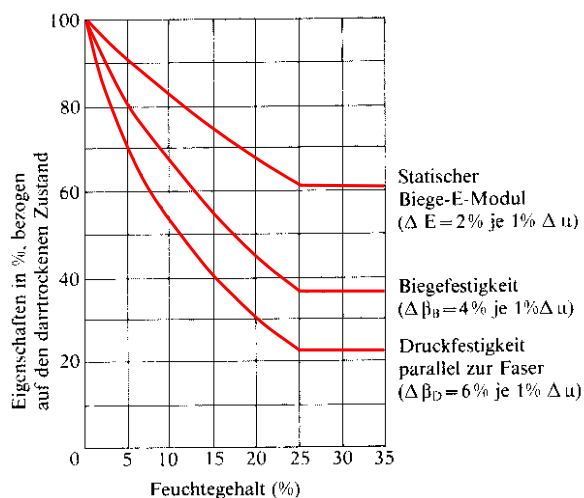


Abb. 8: Abhängigkeit ausgewählter Festigkeits- und Elastizitätskennwerte vom Feuchtegehalt [Hoadley, 1990]

Altholz. Im unmittelbaren Zusammenhang mit häufig wechselnden Quell- und Schwindprozessen stehen dadurch auftretende Schwindrisse. Sie stellen ein Kriterium bei der Nachsortierung von Altholz dar, so dass folgend kurz darauf eingegangen wird.

3.1.3.3.2 Schwindrisse

Schwindrisse selbst stehen in direktem Bezug zur Hygroscopicität denn Risse entstehen, wenn durch das Arbeiten des Holzes die Querkzugspannung aus einer Schwindverformung größer ist als die Querkzugfestigkeit des Holzes. Das ist bei der von außen beginnenden

Trocknung und dem daraus resultierenden Feuchtigkeitsgefälle innerhalb des Querschnitts der Fall. Schwindrisse entstehen als Radialrisse im Bereich der parenchymatischen Zellen. Wichtig für die Größenordnung des Schwindrisses ist u. a. die Einschnittart, denn ein Viertelholz verhält sich in diesem Zusammenhang im bautechnischen Sinne wesentlich besser als ein Vollholz gleichen Querschnitts.

Zur Rissbeurteilung kann gemäß DIN 1052 ein Schwindmaß aus tangentialem und radialem Schwinden, also quer zur Faser, von 0,24 % je 1 % Feuchtigkeitsänderung für europäische Nadelhölzer, Brettschichtholz und Eiche angenommen werden.

Das longitudinale Schwinden kann bei 0,01 % je 1 % Feuchtigkeitsänderung vernachlässigt werden. Für biegebeanspruchte Bauteile ist der Risseinfluss auf die Tragfähigkeit anders als für auf Scherung beanspruchte Bereiche, bei denen der Schwindriss die Scherfläche erheblich reduzieren kann.

Altholz. In historischen Konstruktionen überwiegen Vollholzquerschnitte, die mehrere Jahre und Jahrzehnte benötigen, das Feuchtigkeitsgleichgewicht herzustellen. Der Schwindriss wird sich immer an der querzugschwächsten Stelle ausbilden, also an der Seite, an der der Abstand von der Markröhre zur Bauteiloberfläche am geringsten ist. Vollhölzer mit mittig im Balken liegender Markröhre sind die Regel und bedingen Risse. Für Altholz in eingebautem Zustand kann angenommen werden, dass es seinen Ausgleichsfeuchtegehalt erreicht hat und ein nachträgliches Schwinden bei unveränderter Nutzung nicht zu erwarten ist. Bei der Bewertung von Rissen ist zwingend die Lage von Rissen auf die Beanspruchung zu beziehen. In Abb. 9 sind nach [Frech, 1987] maximale Risstiefen für eine nachträgliche Beurteilung von biegebeanspruchten Hölzern angegeben, die in [Erler, 1997] prinzipiell Bestätigung finden.

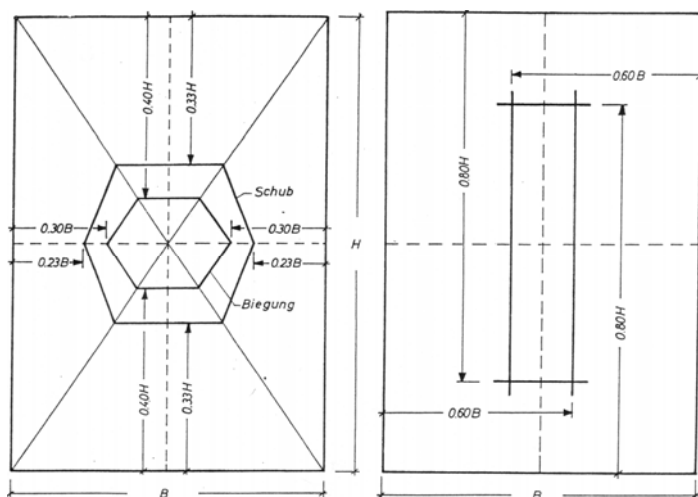


Abb. 9: Unbedenkliche maximale Risstiefen bei Biegebeanspruchung, für beidseitige (links) und einseitige Risse (rechts) [Frech, 1987]

3.2 Holzschädigungen durch Pilze

3.2.1 Klassifizierung und Lebensweise der Pilze

Holz besitzt eine natürliche Widerstandsfähigkeit gegen holzerstörende Pilze und wird nach DIN EN 350-2 in fünf Dauerhaftigkeitsklassen eingestuft. Diese Resistenz ist davon abhängig, welche Kerninhaltsstoffe dem enzymatischen Abbau der durch die Pilzhypen abgegebenen Sekrete widerstehen bzw. deren Neutralisation bewirken können, so dass die Bewertung der Dauerhaftigkeit und der praktische Einsatz gemäß Gebrauchsklasse nur auf das Kernholz und nicht auf den Splint bezogen wird.

Die holzbewohnenden Pilze werden in verfärbende und zerstörende Arten gegliedert.

Abb. 10 gibt die im Bauwesen übliche Einteilung ohne Berücksichtigung weiterer forstwirtschaftlich bedeutender Holzveränderungen durch Sandbräune (Ascomyceten, Deuteromyceten) oder Schleimpilze (Myxomyceten) wieder.

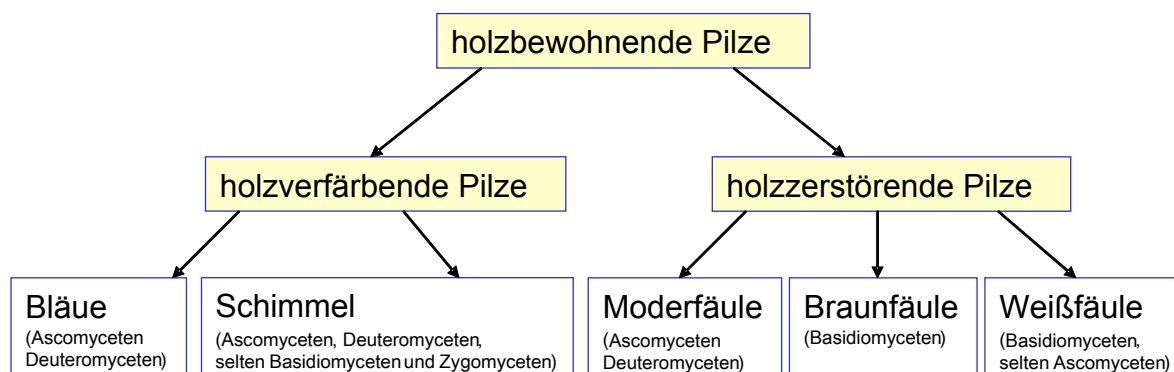


Abb. 10: Klassifizierung von Pilzen im Bauwesen

Im eingebauten Zustand ist Holz mit einem Feuchtegehalt von $\omega < 20\%$ grundsätzlich nicht durch Pilzbefall gefährdet, da das für

- die Auskeimung der Sporen,
- die apikale Enzymausscheidung, den Enzymtransport zu den Bindungsstellen der Substrate
- den Aufbau der Hyphen und
- den Nährstofftransport innerhalb des Myzels

erforderliche Fluid fehlt. Erst ab $\omega = 26\%$ ist die Entstehung eines Neubefalls bei Echtem Hausschwamm [*Serpula lacrymans* (Wulf in Jacq.:Fr.) Schroeter] möglich [Müller, 2005], [Huckfeldt und Schmidt, 2006].

Die Ernährung der **holzverfärbenden Pilze** erfolgt überwiegend aus dem noch in den Holzzellen enthaltenen Protoplasma bzw. den Speicherstoffen in den Lumina. Bei langfristiger Aktivität können diese Pilze jedoch Wegbereiter für eine Besiedlung durch holzerstörende Pilze sein. Das Wachstum und damit die Verbreitung erfolgt innerhalb des Holzes über die Tüpfelöffnungen der Zellwände. Es kann dabei zur teilweisen mechanischen Aufweitung und Zerstörung des Netzgewebes im Bereich der Tüpfel (Margo) kommen. Seltener Durchbrechungen durch spezielle Hyphen (Transpressorien) erfolgen auf rein mechanischem Weg. Nur bei massivem Befall kann der strukturelle Einfluss im Rahmen einer Prüfung, beispielsweise der Bruchschlagfestigkeit, bemerkt werden. Im Übrigen haben holzverfärbende Pilze keinen Einfluss auf die Tragfähigkeit des befallenen Holzes.

Moderfäulepilze zerstören Holz, das hoher und oft wechselnder Feuchtigkeit ausgesetzt ist bzw. im Kontakt mit Erdreich steht. Die beteiligten Ascomyceten und Deuteromyceten lösen

die Zellwandsubstanz enzymatisch vom Zellwandinneren her. Das geschieht unter Bildung typischer schmaler und lang gestreckter Kavernen, die mit dem Fibrillenwinkel der Zellwand schraubenförmig verlaufen. Obgleich die Enzyme denen der Braunfäuleerreger entsprechen, ist die Abbauintensität der primär abgebauten Zellulose geringer [Riedel und Zimmermann, 2001]. Makroskopisch sind deutlich dunkelbraune bis schwarze Verfärbungen des Holzes zu erkennen, aus denen sich mit einer Stechahle muschelförmige Partien heraushebeln lassen. Das quer zur Faser aufreißende Holz (Würfelbruch) zerfällt in fein strukturierte Kuben (Abb. 11).



Abb. 11: Moderfäule bei Nadelholz mit typischer Verfärbung und Würfelbruch durch enzymatischen Abbau

Zur Gruppe der **Braunfäulepilze**, die innerhalb von Gebäuden auftreten können, gehören

- der Echte Hausschwamm [*Serpula lacrymans* (Wulf in Jacq.:Fr.) Schroeter],
- der Braune Kellerschwamm [*Coniophora puteana* (Schum.:Fr.) P. Karsten],
- die Weißen Porenschwämme [Weißer Schmalsporiger Porenschwamm (*Antrodia sinuosa* (Fr.) P. Karsten; Weißer Breitsporiger Porenschwamm (*Antrodia vaillantii* (DC.:Fr.) Ryvarden; Gelber Porenschwamm (*Antrodia xantha* (Fr.:Fr.) Ryvarden)] und
- die häufig Innenfäule verursachenden Blättlinge (*Gleophyllum* spp.).

Braunfäulepilze gehören zu den Makromyceten, die in der Regel gut einzuordnende Fruchtkörper und Myzelien ausbilden. Auf den Lamellen oder Röhren des Fruchtkörperhymeniums werden die Sporen zur geschlechtlichen Vermehrung auf Basidien (Basidiomyceten) gebildet und durch Luftzug, Wasser oder Lebewesen verbreitet. Aus den Sporen wachsen Hyphen aus, die sich mit weiterem Wachstum verzweigen und komprimiert als Myzel mit dem Auge erkennbar sind. Über das Myzel wird die Besiedlung des Substrates, gegebenenfalls auch durch Überwachsen anorganischer Zwischenbereiche, der Nährstofftransport und, wie besonders im Falle des Echten Hausschwammes, der Transport von Wasser sichergestellt. Die Braunfäulepilze bauen Zellulose, Hemizellulosen und Pektine ab, wodurch bereits bei geringer Massereduktion immense Festigkeitsverluste zu verzeichnen sind. Durch den Abbau der Zellulose und Hemizellulosen, verbunden mit Dehydrierungsprozessen der Hauptbestandteile und einsetzendem Schwinden des verbliebenen Ligninanteils, entsteht der für Braunfäule typische Würfelbruch (Abb. 12). Das Ausmaß der Zerstörung ist bei Braunfäulepilzen höher als es bei Weißfäule- und Moderfäulepilzen der Fall ist. Dies wird übereinstimmend bei Laboruntersuchungen festgestellt [von Pechmann und Schaile, 1950], [Winandy und Morell, 1993].



Abb. 12: Braunfäule (*Coniophora puteana*) an der Unterseite einer Dielung

Weißfäulepilze treten bei hohen Holzfeuchten in Gebäuden, aber meist außerhalb an direkt bewitterten Hölzern, wie lagerndem und frischem Holz, auf. Vorzugsweise werden Laubhölzer besiedelt und aus dem Substrat primär Lignin und sekundär Zellulose, Hemizellulosen und Pektine gewonnen. Erfolgt ein Abbau der Substratkomponenten zeitgleich, wird von Simultanfäule gesprochen. Bedeutung haben beispielsweise:

- der Ausgebreitete Hausporling [*Donkioporia expansa* (Desm.) Kotlaba & Pouzar],
- der Schmetterlingsporling [*Trametes versicolor* (L.:Fr.) Pilat] und
- der Ockerfarbige Sternsetenpilz [*Asterostroma cervicolor* (Berk. & Curtis) Masee].

Einige Arten verursachen eine so genannte Marmorfäule, die im frühen Stadium durch schwarze, unregelmäßig verlaufende Grenzlinien gekennzeichnet ist, die bereits befallene und damit hellere Zonen sowie noch nicht befallene Zonen voneinander abgrenzen. Je nach Einbaulage und Exposition kann die Zerstörung zunächst nur im Inneren des Holzes ablaufen. Eine äußere bleibende Schale sorgt dann für Abschottung und Abpufferung von Klimaschwankungen. Das kann sowohl bei peridophytisch als auch bei saprophytisch agierenden Pilzen festgestellt werden.



Abb. 13: Marmorfäule (*Trametes versicolor*) an Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.)

3.2.2 Abbauvorgänge

Hyphenaktivität. Holz besteht aus komplexen organischen Makromolekülen, deren Monomere für holzerstörende Pilze zum körpereigenen Aufbau erforderlich sind. Die Pilzhyphe wachsen innerhalb der Lumina der Holzzellen. Dabei bedingt das Wachstum der Hyphenspitze entlang der Zellwand das Auflösen des Zellwandsubstrates, meist beginnend mit der Assimilation der S_3 - und der anschließenden S_2 -Wandschicht. Es ist auch möglich, dass die S_3 -Schicht und die Mittellamelle lange ungeschädigt bleiben und zunächst der Abbau der S_1 - und S_2 -Schicht stattfindet, wie beispielsweise beim Echten Hausschwamm festgestellt wurde [Huckfeldt, 2003]. Über Durchbrechungen und Aufweitungen der Zellwandschichten oder über das Durchwachsen der Tüpfel werden neue Substratanteile erschlossen.

Der eigentliche Holzabbau findet an der Hyphenspitze statt, die sich in die Apikal-, Subapikal- und Basalzone gliedert. Dabei werden an der Apikalzone Enzyme zum Aufbrechen der Makromoleküle des Holzes genutzt, die als Enzymkomplex spezifisch wirksamer Einzelenzyme zur Verfügung stehen. Noch nicht abschließend ist geklärt, ob die Enzymabgabe ausschließlich über die Apikalzone erfolgt oder über Autolyse (Auflösung) der Hyphen Enzyme frei werden [Huckfeldt, 2003]. An der Spaltung sind synergistisch wirksame Cellobiasen sowie Endo- und Exoglucanasen beteiligt, die glucosidische Makromoleküle in Kettenbruchstücke und Monomere zerteilen. Der abgespaltene Substratbruch wird durch intrazelluläre Vesikel mit der Plasmamembran der Hyphe verschmolzen und in körpereigene Strukturen überführt. Bei Pilzaktivität existiert so ein stetiger Plasmastrom an den Grenzflächen der Apikalzone. Der Nährstoffaustausch funktioniert innerhalb des gesamten Myzelsystems zur Aufrechterhaltung räumlich differenzierter Aktivitäten wie der Strangversorgung und -umbildung oder der Fruchtkörper- und Sporenbildung. Die Transportprozesse laufen dann septenübergreifend ab. Die rückwärtig liegenden lytischen Myzelien, die nicht mehr aktiv sind, bleiben als schlauchförmige Zellwandstrukturen im abgebauten Holzbereich zurück. Es wird davon ausgegangen, dass die Abbauvorgänge bei der **Moderfäule** denen der Braunfäule prinzipiell gleichen [Riedel und Zimmermann, 2001].

Braunfäule. Unter Einwirkung von Pilzenzymen wird Zellulose je nach Fäuletyp mehr oder weniger intensiv in pilzeigene Stoffe überführt. Nach kurzer Befallszeit von 30 Tagen wurde im Labor eine Reduzierung des Zellulosegehaltes in Fichtenholz von 6,7 % durch den Weißen Porenschwamm festgestellt [von Pechmann und Schaile, 1950]. Im Vergleich dazu wurde eine Masseabnahme von 7,1 % ermittelt, so dass der Masseverlust prinzipiell dem Zelluloseabbau zugeordnet werden kann. Hemizellulosen sind als krustenartiger Überzug um die Zellulosefibrillen vorhanden. Bei Angriff holzerstörender Braunfäulepilze bewirkt der von außen voranschreitende Abbau unter Beteiligung von Oxalsäure eine primäre Zersetzung der umhüllenden, hemizellularen Seitenketten. Der Festigkeitsverlust in der frühen Befallsphase steht in direktem Zusammenhang mit der Destrukturierung der Hemizellulosen. Für reine Galactose, Glucose, Xylose und Mannose ist ein Rückgang des Gehaltes nach wenigen Wochen Inkubation festzustellen [Winandy und Morell, 1993]. Bereits nach wenigen Wochen Inkubation durch den Rosafarbenen Saftporling wurde bei Douglasienkernholz eine Abnahme des Arabinosegehalts von etwa 20 % festgestellt [Winandy und Morell, 1993]. Erst danach erfolgen der Abbau von Glucomannan und danach die Depolymerisation der Zellulose. Dies deckt sich mit den bisherigen Erkenntnissen, dass zunächst eine Aufspaltung der Polysaccharide stattfindet und erst später eine Assimilation durch die Pilze erfolgt. Das

Lignin bleibt nahezu unverändert. Lediglich durch Oxidation der Alkohol- und Aldehydgruppen, ausgelöst durch Demethylierung, kommt es zur Nachdunklung des Ligninanteiles im Anschluss an den enzymatischen Abbau [Riedel und Zimmermann, 2001], [Huckfeldt, 2003]. Hervorzuheben ist, dass in [Winandy und Morell, 1993] ein Anstieg des Ligningehaltes bei beginnendem Holzabbau durch Pilze verzeichnet wird. Möglicherweise sind aber mit dem Nachweis bereits gespaltene Holozellulosereste summarisch erfasst worden.

Masseverlust. Bereits bei geringer Rohdichtereduzierung ist bei Moder- und Braunfäulebefall ein immenser Festigkeitsabfall festzustellen, so dass die übliche Festigkeits-Rohdichte-Beziehung keine Gültigkeit besitzt. Ein Maßstab für den Grad der Zerstörung ist der Masseverlust. Dieser ist jedoch insbesondere im frühen Befallstadium kaum wahrnehmbar, obwohl der Einfluss auf die Festigkeit sehr groß ist [von Pechmann und Schaile, 1950], [Liese und Ammer, 1964], [Trendelenburg, 1940]. Der alleinige Ansatz des Masseverlustes zur Einschätzung von Festigkeitskennwerten ist besonders am Anfang eines Pilzangriffes also nicht zuverlässig, da Braunfäuleerreger zunächst chemisch mehr Holzbestandteile aufspalten als sie für das Wachstum verbrauchen [von Pechmann und Schaile, 1950]. Der Masseverlust steht nur dann im abhängigen Verhältnis, wenn die Holzsubstanz in körpereigene Stoffe umgewandelt wird. Verfälschungen treten jedoch auf, da gleichfalls die im Holz enthaltene Biomasse des Hyphensystems steigt. Nach nur 9 - 10 Tagen wurde im Laborversuch eine Massezunahme durch Substratbesiedelung und Stoffzufuhr aus der verwendeten Nährlösung registriert [Trendelenburg, 1940]. Anschließend ist der Masseverlust zunächst mäßig und wird dann deutlicher [von Pechmann und Schaile, 1950], [Liese und Ammer, 1964], [Armstrong und Savory, 1959].

Feuchtigkeit. Übereinstimmend wird festgestellt, dass unter Einwirkung von Braunfäulepilzen der Gehalt an Feuchtigkeit im Holz höher ist als dies ohne Pilzangriff der Fall wäre [von Pechmann und Schaile, 1950]. Dabei existieren scharfe Grenzen und große Feuchtigkeitsunterschiede inner- und außerhalb des befallenen Holzes von 10 % - 30 % für Untersuchungen mit Echtem Hausschwamm [Wälchli, 1980]. Mit zunehmender Befallsintensität bzw. Inkubationsdauer steigt die Feuchtigkeit im Holz an [Winandy und Morell, 1993]. Bei Weißfäulepilzen scheint dies nicht der Fall zu sein, denn nach [von Pechmann und Schaile, 1950] sinkt der Feuchtegehalt ab.

Bei geschädigtem Holz in eingebautem Zustand überlagern sich die geringeren Festigkeitswerte durch den höheren Feuchtegehalt mit der Reduzierung der Festigkeit durch die strukturelle Schädigung.

4 Festigkeits- und Elastizitätsaspekte von Altholz

Im Rahmen des erstellten Versuchsprogramms werden geschädigte und ungeschädigte Althölzer auf ihre Festigkeiten hin geprüft. Aus diesem Grund ist es erforderlich, hierzu veröffentlichte Erkenntnisse einfließen zu lassen, um bereits im Vorfeld Versuchsanordnungen anzupassen und um nach Versuchsdurchführung eigene Ergebnisse richtig beurteilen aber auch verifizieren zu können.

4.1 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeitswerte von Altholz liegen im Bereich derer von Neuholz [Nier, 1994], [Lißner und Rug, 2005], [Ehlbeck und Görlacher, 1993], [Rug und Seemann, 1988] allerdings mit einer deutlichen Erhöhung des Variationskoeffizienten [Weimar, 2000]. Da die Prüfung an fehlerfreien Proben durchgeführt wird, liegt der Bemessungswert der Tragfähigkeit deutlich unter dem Prüfergebnis. Ein Vergleich veröffentlichter Festigkeiten ist nicht immer möglich, da oft Angaben zur Holzart, zur Rohdichte, zur Feuchtigkeit, zum Probenumfang, zu den Variationskoeffizienten oder auch zu möglichen Schädigungen fehlen.

Die Entnahme prismatischer Prüfkörper gemäß DIN 52185 zur Ermittlung der Druckfestigkeit parallel zur Faser ist bei Bestandskonstruktionen kaum möglich, so dass vor Ort Bohrkern entnommen werden. Deren Druckfestigkeiten sind nach [Lißner und Rug, 2005] und [Winter und Held, 1996] ohne Korrekturfaktor übertragbar.

In Tab. 2 sind einige Daten der Druckfestigkeitsprüfungen parallel zur Faser zusammengefasst und vergleichbare Normenwerte aufgeführt. Um einen besseren Überblick zu bekommen, wurden die Druckfestigkeiten bei Angabe der Feuchtigkeitskennwerte auf $\omega = 12\%$ umgerechnet.

Tab. 2: Vergleich der Druckfestigkeiten von Neu- und Altholz¹

Quelle	Holzart			
	Fichte/ Tanne		Kiefer	
	$\sigma_{D\text{mittel}}$ [N/mm ²]	v [%] (n)	$\sigma_{D\text{mittel}}$ [N/mm ²]	v [%] (n)
DIN 68364 (Neuholz, $\omega = 12\%$)	45,0	14,4 bzw. 12,2 (k. A.)	47,0	19,5 (k. A.)
DIN 1052 (C 24)	21,0	k. A.	21,0	k. A.
[Walthelm, 1988] (Holzalter 100 Jahre, ω ohne Angabe Prismen 5x5x10, 2x2x4 [cm]), nach Fotos Nadelholz, Annahme FI/TA	49,8	k. A. (10)	k. A.	k. A.
[Ehlbeck und Görlacher, 1993] (Holzalter 100 - 500 Jahre, $\omega = 12\%$)	42,5	14,2 (191)	39,9	16,9 (122)
[Ehlbeck und Görlacher, 1988] ($\omega = 12\%$, Bauteilprüfung)	35,6	k. A. (3)	k. A.	k. A.

¹ Umrechnung für $\omega = 12\%$ nach Gl. A-25 im Anhang

Pilzschädigung. Die Anwendung der Druckprüfung als Marker bei der Bestimmung einer Pilzschädigung ist nur begrenzt möglich. Vorteilhaft ist, dass die Schwankungsbreite der Ergebnisse weitaus geringer und auch die Probengeometrie vorteilhafter im Vergleich zur Schlagbiegeprüfung ist. Die Druckfestigkeitsprüfung an Kleinprismen eignet sich prinzipiell, um eine Schädigung zu bestätigen, ist jedoch im Vergleich zur Schlagbiegeprüfung weniger empfindlich [Trendelenburg, 1940]. In [Wegelin, 1953] werden durch Weißfäule geschädigte Prismen geprüft und eine Abnahme der Druckfestigkeit in Faserrichtung von 10 % bei einer sichtbaren Schädigung (Verfärbung) von 2/3 des Querschnittes festgestellt.

4.2 Biegefestigkeit

Die Biegefestigkeit ist durch Überschreitung der Biegedruckspannungen oberhalb der Nulllinie gekennzeichnet. Nachdem hier die Plastifizierung einsetzt, verschiebt sich die Nulllinie und die Spannung der Zugzone steigt an, bis die auf Querkzug beanspruchten Fasern versagen und das gesunde Holz splittig bzw. faserig reißt. Bei Betrachtung der charakteristischen Werte der Zugfestigkeit nach DIN EN 338 beträgt die Biegefestigkeit etwa 60 % der Zugfestigkeit.

Ein systematischer Unterschied zwischen neuem und altem Holz bezüglich der Festigkeitskennwerte besteht nicht [Ehlbeck und Görlacher, 1993]. Das wird auch in [Walther, 1988] für 100 Jahre alte Balken, die am Objekt entnommen wurden, bestätigt. Allerdings wird hierbei ein Vergleich der Kleinprüfkörper mit zulässigen Spannungen nach Sortierklassen durchgeführt und es werden nur 6 Prüfkörper getestet. Die Biegefestigkeiten von über 300 Jahre alten Deckenbalken, Sparren, Emporenträgern oder Spannriegeln werden in [Nier, 1994] wiedergegeben. Einige der Hölzer sind durch einen nicht näher quantifizierten Pilz- oder Insektenbefall geschwächt. Die erreichten Biegefestigkeiten der gesunden Hölzer, jeweils nach Holzarten getrennt, sind in Tab. 3 mit weiteren Biegefestigkeiten an Althölzern dargestellt. Die Biegefestigkeiten wurden bei Angabe der Feuchtigkeitskennwerte auf $\omega = 12$ % umgerechnet.

Pilzschädigung. Die Biegefestigkeit ist nach der Bruchschlagfestigkeit der wichtigste Marker zur Feststellung einer frühen Pilzschädigung [Wilcox, 1978]. So wurde bei Reduzierung der Probenmasse um 2 % eine Festigkeitsverringerung von 35 %, um 5 % von 50 % und um 10 % von 60 % und damit eine starke primäre und eine allmähliche sekundäre Abnahme der Biegefestigkeit mit zunehmendem Masseverlust festgestellt.

Bei der Prüfung von durch Moderfäule befallenen Prismen ist auffällig, dass bei starkem Befallsgrad ein stumpfer Bruchrand zuerst auf der Zugseite auftritt [Liese und Pechmann, 1959]. Die Aktivität der Zellulasen bewirkt offenbar, dass die Kraftübertragung des Lignins auf der Druckseite hinter die Versagensgrenze der geschädigten Glucanketten tritt. Die Auswertung der in [Armstrong und Savory, 1959] angegebenen Versuchsreihe mit Moderfäuleschädigungen ist in Abb. 14 dargestellt.

Die Streuung der Biegefestigkeitskennwerte ist bei pilzbefallenem Holz besonders auffällig [Glos und Schulz, 1986], [Glos, 1989]. Der Einfluss von Braunfäule kann höher eingeschätzt werden als der von Weißfäule.

Tab. 3: Vergleich der Biegefestigkeiten von Altholz²

Quelle	Holzart			
	Fichte/ Tanne		Kiefer	
	$\sigma_{Bmittel}$ [N/mm ²]	v [%] (n)	$\sigma_{Bmittel}$ [N/mm ²]	v [%] (n)
DIN 68364 (Neuholz, $\omega = 12\%$)	80	14,2 bzw. 12,7 (k. A.)	85	19,0 (k. A.)
DIN 1052 (C 24)	24	k. A.	24	k. A.
[Walthelm, 1988] (Holzalter 100 Jahre, ω ohne Angabe Prismen 2x2x36 [cm]), nach Fotos Nadelholz, Annahme FI/TA	75,4	k. A. (6)	k. A.	k. A.
[Ehlbeck und Görlacher, 1993] (Holzalter 100 - 500 Jahre, $\omega = 12\%$, Prismen 4x4x8 [cm])	73,1	k. A. (54)	66,8	k. A. (14)
[Ehlbeck und Görlacher, 1988] ($\omega = 12\%$, Prismen)	84	k. A. (28)	73,8	k. A. (12)
[Ehlbeck und Görlacher, 1993] (Holzalter 100 - 500 Jahre, $\omega = 12\%$, Bauteilprüfung)	30,2	k. A. (25)	22,5	k. A. (12)
[Nier, 1994] (Holzalter 46 - 306 Jahre, Bauteilprüfung, Berücksichtigung nur ungeschädigter Hölzer)	36,5	k. A. (26)	41,0	k. A. (4)
[Ehlbeck und Görlacher, 1988] ($\omega = 12\%$, Bauteilprüfung)	29,0	k. A. (13)	23,8	k. A. (5)

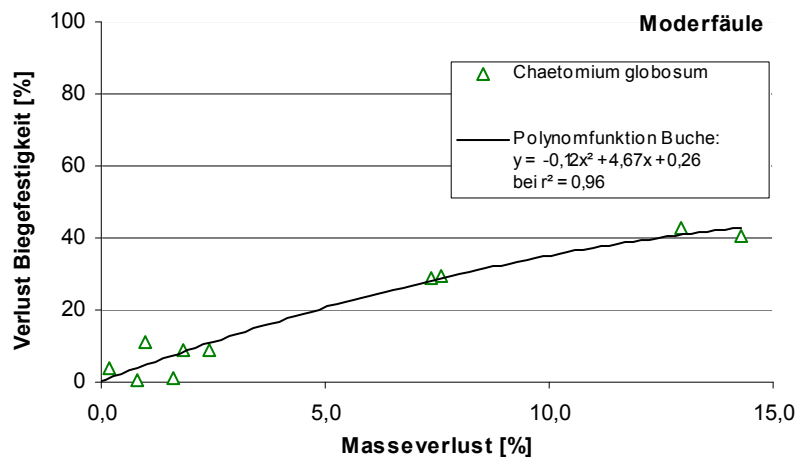


Abb. 14: Biegefestigkeits- und Masseverlust durch Moderfäule nach Auswertung und Datenzusammenführung aus [Armstrong und Savory, 1959]

² Umrechnung für $\omega = 12\%$ nach Gl. A-28 im Anhang

4.3 Biege-E-Modul

Für den viskoelastischen Baustoff Holz wird das erste Drittel der linear verlaufenden Spannungs-Dehnungs-Beziehung, meist bei Biegebeanspruchung, zur Ermittlung des statischen E-Moduls herangezogen. Das Hooke'sche Gesetz hat in diesem definierten Bereich Gültigkeit und beschreibt indirekt die positive oder negative Änderung der eindimensionalen Ausdehnung eines Körpers je Spannungseinheit. Der Kehrwert der Dehnungszahl ist der statische E-Modul. In Tab. 4 sind einige Prüfergebnisse zusammengestellt.

Auch für Altholz besteht eine deutliche Abhängigkeit zwischen dem E-Modul und der Biegespannung ([Ehlbeck und Görlacher, 1988], [Sonderforschungsbereich 315, 1988]). Nach den Untersuchungen in [Nier, 1994] beeinflussen Rohdichte und durchschnittliche Jahrringbreite den statischen E-Modul nur mäßig.

Tab. 4: Vergleich der E-Moduli von Altholz³

Quelle	Holzart			
	Fichte/ Tanne		Kiefer	
	E_{mittel} [N/mm ²]	v [%] (n)	E_{mittel} [N/mm ²]	v [%] (n)
DIN 68364 (Neuholz, $\omega = 12\%$)	11.000	19,7/13,6 (k. A.)	11.000	21,3 (k. A.)
[Ehlbeck und Görlacher, 1988] (Biege-E-Modul, $\omega = 12\%$, Bauteilabmessung)	7.628	k. A. (13)	6.974	k. A. (5)
[Ehlbeck und Görlacher, 1988] (Druck-E-Modul $\omega = 12\%$, Bauteilabmessung)	12.000	k. A. (3)	k. A.	k. A.

Der statische E-Modul kann bei der Prüfung bestehender Konstruktionen über Probelastungen ermittelt werden. Dabei wird ein Belastungsrahmen eingebaut und entweder mit hydraulischen Pressen oder mit Massenelementen die Durchbiegung über entsprechende Wegaufnehmer ermittelt. Hierbei ist durch Anbringung von Wegaufnehmern im Auflagerbereich die Kompression der Balken quer zur Faser zu erfassen. Bei Anbringen einer Messschiene, bei der die Auflagerverformung aufgrund des modifizierten Aufbaus nicht einfließt, kann der Aufwand reduziert werden. Eine festigkeitsrelevante Schwächung der bestehenden Konstruktion durch eine Belastung ist z. B. bei Fichtenholz bis 75 % der Bruchlast nicht zu erwarten [Zienthén, 2008]. Wie in [Görlacher (2), 1991] beschrieben, kann der dynamische E-Modul mittels Ultraschallmessung an bestehenden Holzbauteilen ermittelt und auf den statischen E-Modul geschlossen werden. Die Messung der Laufzeit korreliert danach sehr gut mit dem statischen E-Modul.

Pilzschädigung. Unter der Einwirkung von Pilzen sinkt der E-Modul entsprechend der Verringerung der Elastizität und der Festigkeitskennwerte durch die Strukturstörung. Die bereits weiter oben getroffene Aussage, dass keine prinzipiellen Unterschiede von Moderfäule bei der Beeinflussung der Festigkeiten zur Braunfäule bestehen, lässt sich auch auf den E-Modul anwenden. Nach Datenauswertung [Liese und Pechmann, 1959] kann gemäß

³ Umrechnung erfolgte nach Gl. A-30 im Anhang

Abb. 15 ein Trend, dass der E-Modul bereits bei unter 10 % Masseverlust deutlich sinkt, angegeben werden.

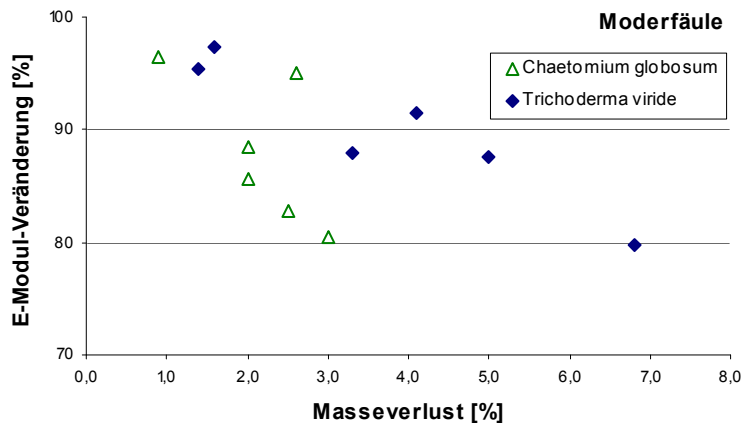


Abb. 15: Veränderung des E-Moduls und der Masse durch Moderfäule nach Auswertung aus [Liese und Pechmann, 1959]

4.4 Bruchschlagfestigkeit

Die Bruchschlagfestigkeit beschreibt die Fähigkeit eines Körpers, die plötzlich auf ihn einwirkende kinetische Energie aufzunehmen und diese durch plastische und elastische Formänderung abzuleiten und umzuwandeln. Werkstoffe mit hoher Bruchschlagfestigkeit werden als zäh, solche mit geringer Bruchschlagfestigkeit als spröde bezeichnet. Im Grunde ist die Bruchschlagfestigkeit ein unter extremen Bedingungen durchgeführter Biegeversuch mit Modifikation vor allem:

- der Lasteinleitungszeit,
- der Lasteinleitungsfläche,
- der Prüfrichtung und
- der Querschnittsgeometrie.

Im Vergleich der Biegefestigkeiten mit Spannungen, die bei Schlagversuchen ermittelt wurde, konnten um etwa 75 % höhere Werte errechnet werden [Kollmann, 1952]. Wie die Biegefestigkeit, ist auch die Bruchschlagfestigkeit vom Feuchtegehalt abhängig.

Bei Fichte und Kiefer gilt für den Feuchtegehaltsbereich von $0 \% \leq \omega \leq 15 \%$, dass mit 1 % steigendem Feuchtegehalt die Bruchschlagfestigkeit um etwa 2,5 % reduziert wird.

In [Weimar, 2000] wird bei der Untersuchung von Fichten- und Kiefernaltholz ein um etwa 20 - 30 % niedrigerer Wert der Bruchschlagfestigkeit im Vergleich zu Referenzproben ermittelt. Die Bruchbilder der Altholzproben wiesen eine deutliche Erhöhung der „extrem kurzfasrigen“ und „kurzfaserigen“ Brüche im Vergleich zur Referenz auf.

Pilzschädigung. Besonders sensibel wirkt sich eine Pilzschädigung auf dynamische Festigkeitskennwerte vor allem im frühen Befallsstadium aus, so dass mit einer raschen Abnahme der Bruchschlagfestigkeit bei Pilzbefall zu rechnen ist [Liese und Ammer, 1964], [Trendelenburg, 1940], [Wilcox, 1978], [Glos, 1989], [Koch, 1999]. So wird in [Trendelenburg, 1940] die Ermittlung der Bruchschlagfestigkeit im Zusammenhang mit der Prüfung von Holzschutzmitteln vorgeschlagen, auch wenn sich die große Streuung der Messwerte nachteilig auswirkt.

Der Bruch ist dabei innerhalb der Zellwand im Allgemeinen im Grenzbereich zwischen der S_1 -Schicht und der Primärwand oder zwischen der S_1 - und S_2 -Schicht zu finden [Bodig und Jayne, 1982]. Bei faserigen Brüchen verläuft der Zellwandbruch entlang der Fibrillen in der S_2 -Schicht. In [Trendelenburg, 1940] wird der Vergleich zwischen Bruchbildern gesunder und pilzbefallener Probekörper dargestellt, wobei sich diese wenig für die Einstufung des Befallsgrades eignen.

Obwohl kein grundsätzlicher Unterschied bei der Bewertung der Festigkeiten pilzbefallenen Buchenholzes zwischen Moderfäule und durch Basidiomyceten verursachten Holzschädigungen besteht, sollte eine unmittelbare Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Nadelholz nicht vorgenommen werden [Liese und Ammer, 1964].

In Laborversuchen war nach drei Monaten bei einer wöchentlichen Reduzierung der Masse um 0,5 % - 2,5 % eine Reduzierung der Bruchschlagfestigkeit durch Moderfäule auf 51 % - 61 % [Liese und Ammer, 1964] bzw. nach [Glos, 1989] bei 6 Monaten auf 50 % der Bruchschlagfestigkeit festzustellen. Die Abnahme der Bruchschlagfestigkeit ist im Bereich der Masseabnahme bis 7 % besonders stark, denn bei 6,8 % Masseverlust wurde eine Verringerung auf 84 % ermittelt [Trendelenburg, 1940], [Wilcox, 1978].

Der extreme Festigkeitsverlust setzt sich bei einer weiteren Massereduzierung bis 10 % fort und ab etwa 15 % Masseverlust wird die Kurve der Festigkeitsabnahme flacher und wird sich mit zunehmendem Holzabbau der Abszisse annähern.

Bei Braunfäuleschädigung ist bereits bei geringem Masseverlust eine deutlichere Abnahme der Bruchschlagfestigkeit im Vergleich zu Weißfäule zu verzeichnen [von Pechmann und Schaile, 1950], [Armstrong und Savory, 1959], [Liese und Pechmann, 1959], [Niemz, 2001], [Zycha, 1964], [Brischke et al., 2008]. Das wird in [Wegelin, 1953] mit der interstrukturellen Kerbwirkung erklärt. Diese ist intensiver, je mehr Fehlstellen innerhalb der Zellwandschichten vorhanden sind und zu Spannungsspitzen in deren Rand-, Rundungs- bzw. Eckbereichen führen. Kann ein Riss initiiert werden, wird sich dieser rasch ausbreiten. An der Riss Spitze und den angrenzenden Flanken werden Spannungsspitzen durch Verformung der Struktur, dem Aufreißen, abgebaut. Aus den verfügbaren Daten lässt sich zusammenfassen, dass in der frühen Phase des Holzabbaues, der sich nicht linear über den Masseverlust ablesen lässt, die Festigkeitsbeeinflussung sehr groß ist. In Abb. 16 ist dargestellt, dass im Bereich bis 3 % Masseverlust der Abfall der Bruchschlagfestigkeit bis nahezu 60 % betragen kann.

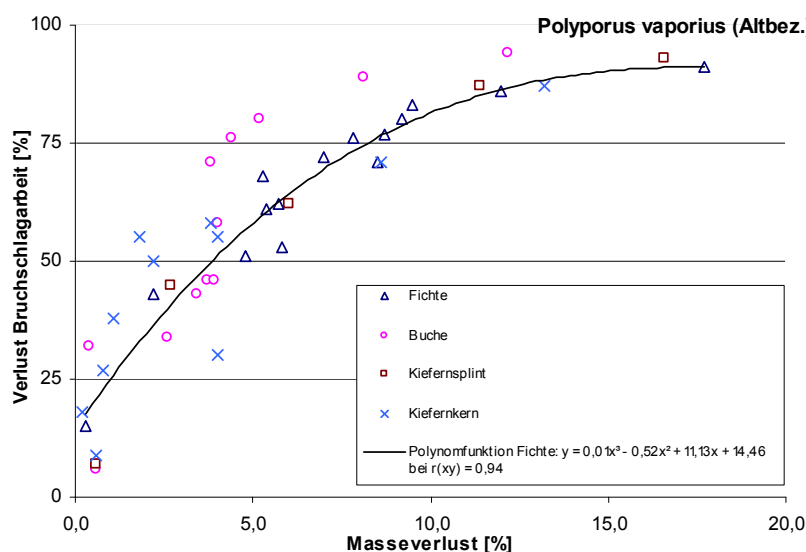


Abb. 16: Verlust von Bruchschlagarbeit und Masse durch Echten Hausschwamm nach Auswertung und Datenzusammenführung aus [von Pechmann und Schaile, 1950]

5 Ausgewählte zerstörungsfreie und -arme Prüfverfahren zur Charakterisierung von Holz

5.1 Ultraschall am Holz

Bei der Auswahl des zerstörungsfreien Ultraschallechoverfahrens spielte die gute Handhabbarkeit und Praxistauglichkeit, gleichzeitig aber auch das hohe und teilweise unerforschte Potenzial des Verfahrens eine entscheidende Rolle. Der aktuelle Stand der Forschung zum Ultraschall im Allgemeinen und zum Ultraschallecho bei der Untersuchung von Holzkonstruktionen im Besonderen wird folgend dargestellt.

5.1.1 Grundlagen

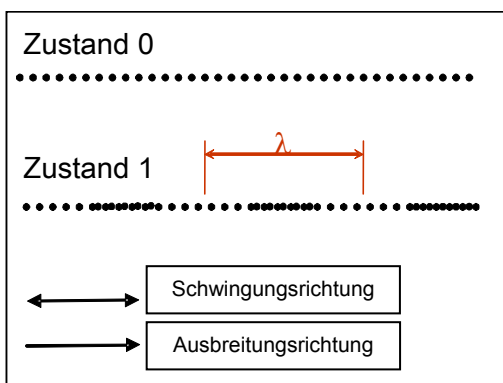
Bei der Bauteilprüfung mit Ultraschall werden durch Anregungsimpulse mechanische Wellen im Prüfkörper hervorgerufen. Der Impulseintrag erfolgt durch piezoelektrische Prüfköpfe, die als Punktkontaktprüfköpfe direkt am Holz aufliegen oder als zylindrische Flächenprüfköpfe einen sehr hohen Anpressdruck bzw. Koppelmittel wie Vaseline oder Ultraschallgel benötigen. Die Verwendung von Koppelmitteln erwies sich jedoch unter den Bedingungen vor Ort als wenig praktikabel [Hasenstab (2), 2007], so dass Punktkontaktprüfköpfe einen erheblichen zeitlichen und arbeitstechnischen Vorteil darstellen und bevorzugt zum Einsatz kommen. Die Schallimpulse durchlaufen das Bauteil und werden von in der Regel baugleichen Prüfköpfen empfangen. Prinzipiell wird zwischen Longitudinal- und Transversalwellen unterschieden, für die jeweilig entsprechende Prüfköpfe angeboten werden [Krautkrämer, 1986].

Die Longitudinalwelle wird auch als Dichte-, Längs-, Kompressions-, Druck- oder kurz p-Welle bezeichnet. Sie kann sich in allen festen, flüssigen und gasförmigen Medien ausbreiten. Die Schwingungsrichtung ist parallel zur Ausbreitungsrichtung.

Die Transversalwelle wird auch als Quer-, Schub-, Scher- oder kurz s-Welle bezeichnet, da die Schwingungsrichtung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung ist. Eine Übertragung von Scherkräften von einem Teilchen eines Mediums auf ein anderes ist nur bei festen Stoffen, nicht bei Gasen und Flüssigkeiten möglich. In Abb. 17 sind die Wellenarten als Prinzipskizzen dargestellt.

Longitudinalwelle

Schwingung in Ausbreitungsrichtung



Transversalwelle

Schwingung quer zur Ausbreitungsrichtung

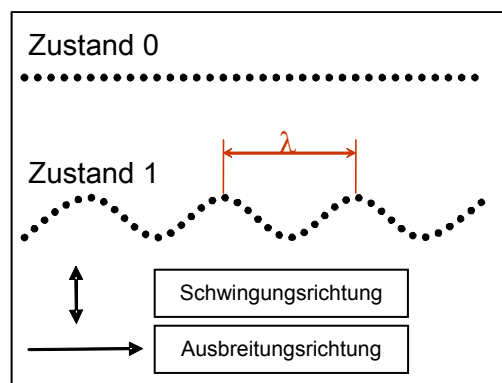


Abb. 17: Prinzipskizzen zur Longitudinal- und Transversalwelle, Markierung der Wellenlänge λ

Zusätzlich zu den beiden genannten Wellentypen treten Mischformen bei begrenzten bzw. endlichen Medien auf, wenn eine freie Welle auf eine un stetige Veränderung der Ausbreitungsbedingungen trifft. Diese werden als Dehn- oder als Biegewellen, als Torsionswellen oder auch als Oberflächenwellen beschrieben. Diese Wellen laufen entlang ebener und gekrümmter Oberflächen und besitzen eine theoretische Eindringtiefe von etwa einer halben bis einer Wellenlänge (λ) [Steeb, 2005]. Während Dehn- und Biegewellen insbesondere bei der Durchschallung von dünnen und Torsionswellen bei schlanken stabförmigen Prüfkörpern relevant sind, treten Oberflächenwellen bei der Baustoffprüfung von Beton oder Holz insbesondere bei Prüfkörpergeometrien $\gg \lambda$ auf.

Die Schallgeschwindigkeit wird mit v oder c bezeichnet. Die Geschwindigkeiten von Longitudinal-, Transversal- und Oberflächenwellen können gemäß Anhang nach Gl. A-33 bis Gl. A-36 [Steeb, 2005] ermittelt werden und sind in diesem Zusammenhang als Materialkonstanten zu sehen.

Die eingesetzten Ultraschall-Prüfköpfe arbeiten mit Frequenzen von 15 - 250 kHz. Innerhalb dieses Frequenzspektrums ermöglichen die höheren Frequenzen aufgrund der veränderten Wellenlänge theoretisch eine höhere Auflösung (Tab. 5). Die Wellenlänge errechnet sich nach Gl. A-37 im Anhang.

Tab. 5: Frequenzen und Wellenlängen für Holz beispielhaft bei einer Schallgeschwindigkeit von 1,15 km/s

Frequenz [kHz]	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	85	100
Wellenlänge [cm]	4,6	3,8	3,3	2,9	2,6	2,3	2,1	1,9	1,8	1,6	1,4	1,2

Die Dämpfung des Impulses durch den inhomogenen und porösen Baustoff Holz ist erheblich und erfordert leistungsstarke Prüfköpfe im Niederfrequenzbereich. Unter Dämpfung ist die Veränderung des Schallsignals bezüglich Amplitude und Form zu verstehen. Diese Veränderung nimmt mit steigendem Abstand (dx) von der Impulsquelle durch folgende Einflüsse zu:

- Divergenz
 - Abnahme der Schallintensität mit $(dx)^2$
 - Abnahme des Schalldrucks mit (dx)
- Schallschwächung
 - Absorption
 - Umwandlung der kinetischen Energie in Wärme durch Reibung
 - Zunahme linear mit (dx)
 - Zunahme linear mit kleinerer Wellenlänge
 - Dispersion
 - frequenzabhängig
 - für übliche Holzdimensionen ohne Bedeutung [Schlengermann, 1992]
 - Beugung
 - Streuung
 - Zunahme mit $(dx)^2$ [Schlengermann, 1992]
 - Streukörper mit $\varnothing > 1/10 \lambda$ sind messbar [Hasenstab, 2008]
 - Reflexion

Beim Auftreffen der Wellen auf einen Bereich, der von den bisherigen Materialeigenschaften abweicht (Impedanzunterschied), wird ein Teil der Welle reflektiert und ein Teil transmittiert. Der Schallimpuls regt diesen Bereich zum Schwingen um die eigene Ruhelage an und wird damit selbst zum Schwingungserreger mit gleicher Frequenz. Die Initiierung einer derartigen sekundären Schallquelle führt bei der Aufzeichnung zu einer Phasenverschiebung, also zu längerer Laufzeit. Im Vergleich zur Primärwelle verändern sich der Richtungssinn und die Intensität der Sekundärwelle.

In welchem Maß an der Grenzfläche zweier Medien Reflexion und Transmission (Durchlässigkeit) bei senkrecht zur Durchschallungsebene laufenden Wellen auftreten, wird über entsprechende Reflexions- (R) und Durchlässigkeitsfaktoren (D) bzw. der Schallkennimpedanz (Z) im Zusammenhang mit dem Schalldruck beschrieben [Steeb, 2005].

$$R = \frac{(\rho_2 \cdot v_2) - (\rho_1 \cdot v_1)}{(\rho_2 \cdot v_2) + (\rho_1 \cdot v_1)} \quad \text{Gl. 5-1}$$

$$D = \frac{2 \cdot (\rho_2 \cdot v_2)}{(\rho_2 \cdot v_2) + (\rho_1 \cdot v_1)} \quad \text{Gl. 5-2}$$

mit:	R	Reflexionsfaktor [-]
	D	Durchlässigkeitsfaktor [-]
	v_i	Geschwindigkeit der auftreffenden Welle je Medium [m/s]
	ρ_i	Dichte je Medium [kg/m³]

Mit Definition einer Schallkennimpedanz $Z_i = \rho_i \cdot v_i$ wird ein Wellenwiderstandsfaktor definiert, aus dem sich vereinfacht die folgenden Formeln ergeben.

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad \text{Gl. 5-3}$$

$$D = \frac{2 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad \text{Gl. 5-4}$$

Zur Wiedergabe eines Größenverhältnisses V wird häufig ein Maß in Dezibel (dB) angegeben:

$$\text{dB} = 20 \lg V \quad \text{Gl. 5-5}$$

Nach den o. g. Formeln können beispielhaft R, D und Z für einen Fichtenprüfkörper ermittelt werden: bei Zugrundelegung einer Rohdichte des astfreien Holzes von $\rho_{12} = 0,43 \text{ g/cm}^3$, einer Rohdichte des Astes von $\rho_{12} = 0,85 \text{ g/cm}^3$, einer Schallgeschwindigkeit von $v_{T \perp \text{II Holz}} = 1100 \text{ m/s}$ und einer Schallgeschwindigkeit von $v_{T \perp \text{II Ast}} = 1921 \text{ m/s}$ beträgt die Schallkennimpedanz $Z_{\text{Holz}} = 4,73 \cdot 10^6 \text{ kg/(m}^2\text{s)}$ bzw. $Z_{\text{Ast}} = 1,63 \cdot 10^6 \text{ kg/(m}^2\text{s)}$. Daraus lassen sich die Faktoren für den Übergang Holz-Ast mit $R_{\text{H-A}} = 0,55$ (-5,2 dB) und $D_{\text{H-A}} = 1,55$ (3,8 dB) sowie Ast-Holz mit $R_{\text{A-H}} = -0,55$ (-5,2 dB) und $D_{\text{A-H}} = 0,45$ (-7,0 dB) abschätzen, auch wenn das Wellenverhalten an den Grenzflächen aufgrund der Rohdichteübergänge oder der Faserstruktur bei den Praxismessungen vielschichtiger ist.

Die oben ermittelten Reflexions- und Durchlässigkeitsfaktoren bedeuten, dass eine Reflexion an Astgrenzflächen gut möglich ist und Schallwellen aus dem Ast nur geschwächt weitergegeben werden können ($D_{\text{A-H}}$), wenn ein Wellenübergang in den Astbereich erfolgt. Im Falle von $D_{\text{H-A}}$ erfolgt kein Wellenübergang. Beim Übergang der Wellen vom Holz in den Astbereich oder umgekehrt kommt es neben einer Phasenumkehr zusätzlich zur Veränderung der Wellenrichtung durch Brechung.

Unter Berücksichtigung der kreisförmigen Grenzfläche eines Astes und der Vielzahl der durch den Verlauf der Astoberfläche veränderlichen Ein- und Ausfallsbedingungen wird die Komplexität der Thematik deutlich, insbesondere bei der Bewertung eines Echsignals, wenn Akustiksprünge mehrfach durchlaufen werden.

5.1.2 Echotechnik

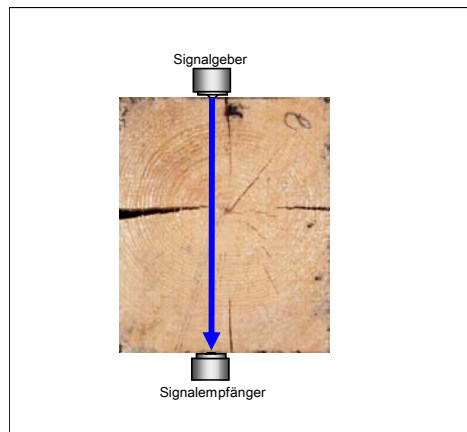
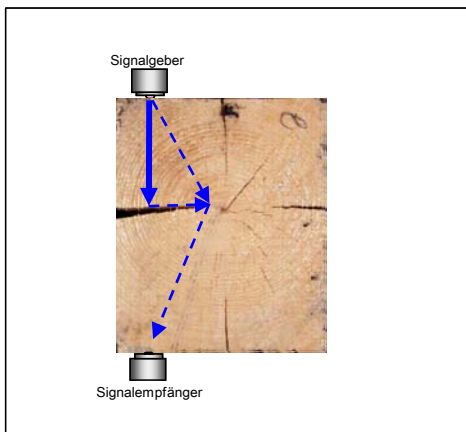
Der Vorteil der Echotechnik besteht darin, dass Sender und Empfänger nur von einer Seite angekoppelt werden müssen und damit eine mehrseitige Zugänglichkeit des Prüfkörpers nicht erforderlich ist (Abb. 18). Das Verfahren beruht auf der Reflexion der Schallwellen an den Grenzflächen des Werkstoffes: die Welle durchläuft dabei das Material, trifft auf eine Grenzfläche (Impedanzunterschied), wird reflektiert und durchläuft das Material zurück. Der oder die Signalempfänger befinden sich ebenso auf der frei zugänglichen Oberfläche des Holzes und registrieren das Echo der ausgesandten Wellen. Neuere Transversal-Prüfköpfe sind als Kontaktarray mit bis zu 36 einzeln federnd gelagerten Punktkontaktprüfköpfen ausgestattet [Hasenstab et al., 2006]. Der Begriff Array steht in diesem Zusammenhang für die Anordnung und Zusammenschaltung der Einzelprüfköpfe (vgl. Abb. 36 auf Seite 62). So kann aus der Laufzeit der reflektierten Ultraschallimpulse auf die Lage des Reflektors geschlossen werden (Gl. A-38 und Gl. A-39 im Anhang). Dies setzt jedoch die Kenntnis der baustoffspezifischen Schallgeschwindigkeit voraus. Ein Reflektor kann eine Begrenzungsfläche (z. B. Bauteilrückwand, Riss) oder ein extremer Dichtesprung (Ast) sein. Aus den bisherigen Erkenntnissen kann bei einem deutlichen Rückwandecho auf einen defektfreien Probekörper geschlossen werden [Hasenstab, 2008]. Bei Ausbleiben des Echos ist mit Fehlstellen zu rechnen, so dass die Ortung von verdeckten Schäden und sonstigen deutlichen Inhomogenitäten möglich ist [Baron et al., 2008]. Die verfügbare Gerätetechnik ist nicht allein zur Prüfung an Holz bestimmt, so dass eine Konfiguration beispielsweise

- der Pulsspannung (Amplitude),
- der Pulsfrequenz,
- der Pulszahl je Sekunde oder
- der Pulsanzahl für eine Mittelung

vorgenommen werden muss. Diese Einstellungen bedürfen bei Holz mehr oder weniger intensiver Vorprüfungen, um optimale Ergebnisse zu erzielen.

Vom Anwender müssen die Einflusskriterien des inhomogenen und anisotropen Holzes beim Einsatz der Ultraschalltechnik beachtet werden. Das zerstörungsfreie Verfahren dient der Untersuchung an einer Stelle eines Baukörpers. Werden Prüffarrays eingesetzt, ist die Aussage einer Messung als Mittelwert für die mit dem Array überdeckte Fläche anzusehen.

Durchschallungsdetektion



Echodetektion

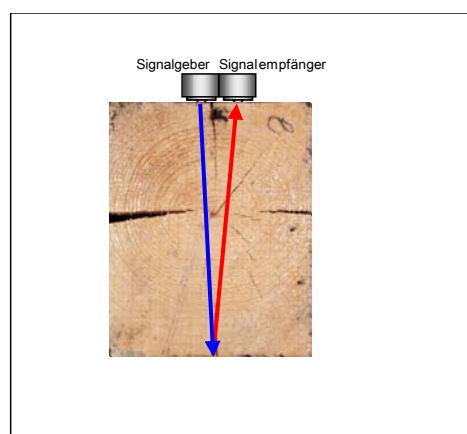
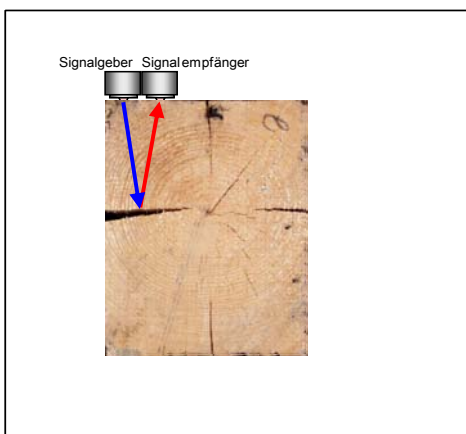


Abb. 18: Prinzipdarstellung der Durchschallungs- und der Echotechnik

5.1.3 Einflussgrößen

Bei dem Einsatz von Messgeräten ist die genaue Kenntnis der Funktionsweise des Prüfverfahrens aber auch die holzanatomischen und holzphysikalischen Einflüsse zu berücksichtigen und für die korrekte Interpretation der Messwerte erforderlich.

5.1.3.1 Faserrichtung

Die Schallgeschwindigkeit beträgt bei **Longitudinalwellen** rechtwinklig zur Faser etwa 33 % bis 25 % der in Faserrichtung. Tangential beträgt sie etwa 75-85 % der radialen Orientierung [Burmester, 1965]. Sie kann detaillierter mittels einer Gleichung 2. Ordnung beschrieben werden [Niemz et al., 1999], mit dem Ergebnis, dass bereits bei einer Abweichung von 10° eine Reduzierung der Schallgeschwindigkeit auf 80 % bei Fichtenholz bzw. auf 85 % bei Buchenholz, im Vergleich zu den Werten in Faserrichtung, gemessen wurden.

Wird der Einfluss der Erhöhung der Messfrequenz untersucht, so ist die daraus resultierende Zunahme der Schallgeschwindigkeit in Faserrichtung deutlicher als in radialer und tangentialer Richtung [Niemz, 2003] (Abb. 19). Die Verhältniszahlen der dynamischen E-Moduli verhalten sich ähnlich denen der Schallgeschwindigkeit und betragen rechtwinklig zur Faser

nur etwa 33 % bis 25 % als in Faserrichtung sowie tangential etwa 75 % als in radiale Orientierung [Burmester, 1965].

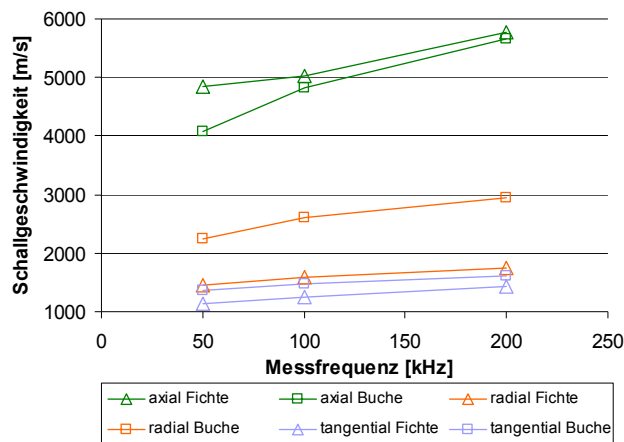


Abb. 19: Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von Longitudinalwellen vom Faserwinkel nach Zusammenfassung aus [Niemz, 2003]

Bei **Transversalwellen** sind für jede Ausbreitungsrichtung zwei Schwingungsrichtungen möglich. Die größten Laufgeschwindigkeiten bestehen bei Ausbreitung in Faserrichtung. Rechtwinklig dazu wurden bisher keine signifikanten Unterschiede festgestellt [Hasenstab, 2006]. Gleichzeitig liegt hierin das Potenzial der Untersuchung von Bestandskonstruktionen, da diese in der Regel rechtwinklig zur Faser geprüft werden und der Tangential- und Radialanteil des durchschallten Querschnitts damit nicht berücksichtigt werden muss.

5.1.3.2 Feuchtigkeit

Mit zunehmendem Feuchtegehalt des Holzes verringert sich bei **Longitudinalwellen** die Schallgeschwindigkeit.

Die Abnahme der Schallgeschwindigkeit ist von 0 % Feuchtegehalt bis zur Fasersättigung stärker bemerkbar als oberhalb des Fasersättigungspunktes bis zur maximalen Wasseraufnahme [Burmester, 1965], [Bektha et al., 2002], [Burmester, 1967] (Abb. 20).

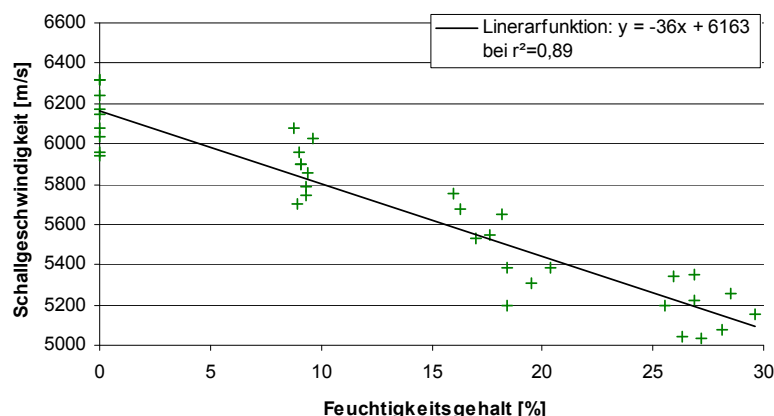


Abb. 20: Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von Longitudinalwellen vom Feuchtegehalt bis Fasersättigung nach Auswertung und Datenauswahl aus [Burmester, 1965]

Der Betrag des Anstiegs der linear beschriebenen Funktion beträgt im Bereich von $\omega = 0$ % bis etwa 30 % ca. das 6-fache im Vergleich zum Bereich von $\omega \approx 30$ % bis zur Wassersättigung. Theoretisch würde sich bei Extrapolation die Schallgeschwindigkeit von Wasser bei einem Feuchtegehalt im Holz von $\omega = 732$ % ergeben. Allerdings wird eine

asymptotische Schallgeschwindigkeitsabnahme eintreten, so dass die lineare Annäherung bei extrem hohen Holzfeuchtigkeiten keine Gültigkeit mehr besitzt [Burmester, 1965].

Für **Transversalwellen** konnten keine detaillierten Literaturnachweise zum Einfluss der Holzfeuchtigkeit auf die Schallgeschwindigkeit bei üblichen Bauholzabmessungen ermittelt werden, so dass hierzu grundlegender Forschungsbedarf besteht (Kapitel 6.2.2.4).

5.1.3.3 Rohdichte

Die Rohdichte beeinflusst maßgeblich die Schallgeschwindigkeit (vgl. Kapitel A 1.4.1 im Anhang). Innerhalb eines Nadelholzjahrringes sind die Spätholztracheiden stets länger als die Frühholztracheiden. Die Spätholztracheiden besitzen im Übergangsbereich zwischen Früh- und Spätholz den größten Wandquerschnitt, so dass in dem Bereich der größten Rohdichte die größte Schallgeschwindigkeit für **Longitudinalwellen** zu erwarten ist [Burmester, 1965]. Zudem nimmt gerade bei den Nadelhölzern die Jahrringbreite mit zunehmendem Alter durch Reduzierung des Frühholzanteiles und damit prozentualer Vergrößerung des Spätholzanteiles ab. Die Schallgeschwindigkeit in den äußeren Stammbe-reichen ist entsprechend höher, da sie von der Spätholzroh-dichte wie oben erläutert in entscheidendem Maße geprägt wird. Bemerkenswert ist dazu, dass beim Vergleich von Fichte und Buche festgestellt wurde, dass die Schallgeschwindigkeit in Faserrichtung bei Fichtenholz deutlich größer, senkrecht zur Faser jedoch kleiner als bei Buchenholz ist [Niemz, 2003].

In [Winter und Held, 1996] wurden verschiedene Messverfahren verglichen. Die aus der Ultraschall-Impuls-Laufzeitmessung ermittelten Werte der Rohdichte ergaben in drei von vier Fällen eine schlechtere Einstufung als die Untersuchungen auf Grundlage der Bohrkernana-lyse. Eine Ursache könnte darin zu finden sein, dass die (mittlere) Rohdichte des gesamten Querschnittes über die Bauteillänge (Laufweg des Schalls) zu stark von der örtlich begrenz-ten Rohdichte des Bohrkerns abweicht. Interessant ist, dass bei Versuchen an ungeschädig-tem, zum Teil frischem Holz ein besserer Korrelationskoeffizient mit geringerer Streuung für die Abhängigkeit des dynamischen E-Moduls von der Biegefestigkeit ermittelt werden konnte als für die Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Rohdichte [Blaß und Frese, 2002].

Für **Transversalwellen** konnten in der Literatur keine detaillierten Untersuchungen zum Einfluss der Rohdichte auf die Schallgeschwindigkeit bei üblichen Bauholzabmessungen ermittelt werden, so dass auch hier grundlegende Untersuchungen angestellt werden müssen (Kapitel 6.2.2.2).

5.1.3.4 Äste

Innerhalb der Äste ist in axialer und radialer Richtung der Unterschied in den Schallge-schwindigkeiten von **Longitudinalwellen** wesentlich geringer als bei Stammholz [Burmester, 1967]. Damit wird prinzipiell die Astdetektion erleichtert. Bei der Ermittlung des dynamischen E-Moduls mit Longitudinalwellen werden Äste bzw. lokale Fehlstellen nicht oder nur bedingt erkannt. Ein einzelner großer Ast beeinflusst den ermittelten dynamischen E-Modul bei üblichen Querschnitten nur unwesentlich, da die Wellen den Ast umlaufen und die Änderung des Schallweges im Verhältnis zur Laufzeit relativ gering ist. Bei kleineren Balkenabmessun-gen würde ein großer Einzelast jedoch den Belastungsschwachpunkt darstellen, so dass

damit die Qualitätseinstufung über den dynamischen E-Modul in Kombination mit anderen Verfahren vorgenommen werden muss.

Kleinere Inhomogenitäten (kleine Äste) wirken sich kaum aus und sind im Rahmen der üblichen Schwankungen unbedeutend [Blaß und Frese, 2002]. Ab welcher Größe Äste erkannt werden, wird in der Literatur recht unterschiedlich bewertet. In [Tobisch und Mittag, 1998] werden an Probekörpern simulierte Äste ab einem Durchmesser von 20 mm durch die auftretende Dämpfung um 67 % erkannt.

Für **Transversalwellen** liegen einige praktische Erfahrungen vor [Hasenstab, 2006, hier auch weitere detaillierte Verfahrensdarstellung], [Hasenstab, 2008]. Astquerschnitte von etwa 20 mm wurden bei einer Sparrendicke von etwa 17 cm über das Ausbleiben des Rückwandsignals bei der Prüfung mit Ultraschallechotechnik erkannt [Hasenstab, 2006]. Es wird zusätzlich darauf hingewiesen, dass neben der Streuung durch die Äste selbst, das den Astbereich umgebende Holz die Schallleitung beeinträchtigt und zu ausbleibenden Amplituden führt.

Bei den Untersuchungen in der Literatur wird auf die Unterscheidung zwischen Weiß- und Schwarzästen meist nicht eingegangen.

5.1.3.5 Altholz und Holzschädigungen

Bei der Prüfung vermutlich ungeschädigter Althölzer mit **Longitudinalwellen** ließ sich bei einer Reduzierung der Laufgeschwindigkeit von lediglich 6,5 % nicht auf die festigkeitsbestimmende Qualität des Holzes schließen [Nier, 1994].

Untersuchungen an bis zu 180 Jahre altem ungeschädigtem Holz ergaben, dass die Schalldämpfung im Holz nahezu unverändert ist [Holz, 1981] und dass die Streuung des so ermittelten dynamischen E-Moduls zum statischen E-Modul gering ist [Steck und Görlacher, 1987].

Im geschädigten Bereich resultiert aus der Verringerung der Rohdichte und einhergehenden strukturellen Fehlstellen und Mikrorissen sowie aus Veränderung der Ausgleichsfeuchte eine veränderte Laufzeit. Durch Pilzbefall geschädigte Bereiche stellen Fehlstellen dar, an denen die Schallwellen gedämpft werden und aus denen eine Veränderung der Schalllaufzeit resultiert. Braunfäule ruft eine stärkere Abnahme der Schallgeschwindigkeit hervor als Weißfäule. Die Untersuchung simulierter Innenfäule ergab, dass bei einem 10%igen Querschnittsdefekt die Schallgeschwindigkeit von Fichte auf 90 % des Ausgangswertes und bei einem 30%igen Querschnittsdefekt auf 85 % fällt. Bei Untersuchung der Ultraschalldämpfung erhöht sich diese bei 10 % Querschnittsschwächung bei Fichte um 60 % und bei Eiche um 45 %. Bei einer Prüffrequenz von 50 kHz zeichnen sich Fehlstellen ab etwa 20 mm Durchmesser ab, bei kleineren Fehlstellen kommt es zur zusätzlichen Impulsdämpfung [Tobisch und Mittag, 1998].

In [Konarski und Wuzny, 1977] wurden Untersuchungen an Holz durchgeführt, das mit Braunem Kellerschwamm (*Coniophora puteana* Fr.) befallen war. Entsprechend der durch den Pilzbefall ausgelösten Rohdichtereduzierung sank die Ultraschallgeschwindigkeit. Der stärkste Abfall wurde in radialer Richtung festgestellt. Der Zusammenhang zwischen Masseverlust und Schalllaufzeit lässt sich insbesondere bei Braunfäule im frühen Stadium kaum feststellen, da zunächst eine Depolymerisation stattfindet, die keinen Masseverlust, wohl aber einen Rückgang der Laufzeit zur Folge hat.

Für **Transversalwellen** liegen praktische Erfahrungen vor [Hasenstab, 2006], [Hasenstab, 2008], [Baron et al., 2008], [Hasenstab und Krause, 2006] die auf der Echotechnik beruhen. Oberflächennahe Schäden im Bereich der Impulseinleitung dämpfen sehr stark. Hinzu kommt häufig eine Vielzahl von Rissen, die zusätzlich zu Abschattungs- und Streueffekten führen. Die Detektion von Schäden kann indirekt über das Ausbleiben des Signals erfolgen.

5.1.4 Messdarstellung

Die registrierten Laufzeiten und deren Amplituden werden graphisch als A-, B-, C- oder D-Bilder dargestellt. Das A-Bild resultiert aus der Messung an einer Stelle (Abb. 21), bei der die Signale als Amplitude in Abhängigkeit von der Laufzeit dargestellt werden. Dabei werden die Amplituden der jeweiligen Laufzeit der Schallsignale meist als Grauwerte interpretiert. Helle Bereiche sind dann mit geringer Amplitude, dunkle oder schwarze Bereiche mit hoher Amplitude gleichzusetzen (Abb. 22).

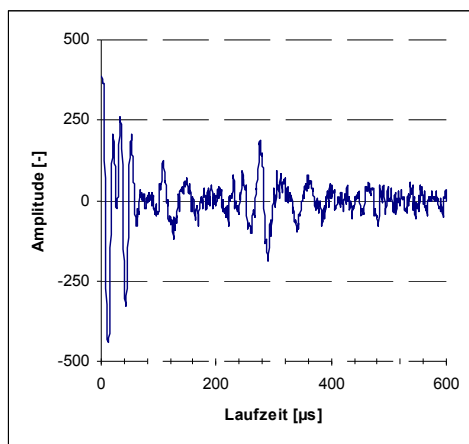


Abb. 21: A-Bild eines Holzprüfkörpers (Wechselsignal, 55 kHz)

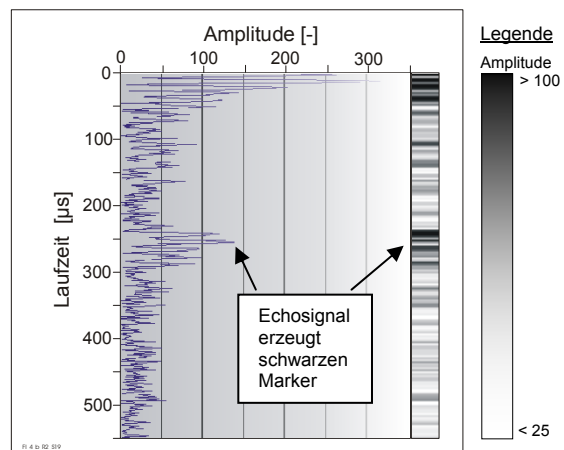


Abb. 22: A-Bild einer Ultraschallechoprüfung eines Holzbalkens (gleichgerichtetes Signal), rechtsseitige Grauwertskala als Amplitudenmarker, 55 kHz

So kann bei einer deutlichen Schwarzmarkierung einer zugehörigen Laufzeit die Lage von Messauffälligkeiten, z. B. der Bauteilrückwand, über den Grauwert erkannt werden, wenn die Schallgeschwindigkeit des Materials bekannt ist.

Aus mehreren A-Bildern kann ein B-Bild zusammengesetzt werden. Dabei werden die einzelnen Grauwerte der A-Bilder aneinander gesetzt. Das so entstandene B-Bild gibt damit die Amplituden entlang einer Messspur wieder.

Das C-Bild ist die Darstellung einer rechtwinklig zum B-Bild liegenden Ebene, vergleichbar mit der Sicht von oben auf den Probekörper. Auch hierbei werden die Amplituden über zugeordnete Grau- oder Farbtintensitäten dargestellt.

Das D-Bild ist die Abbildung der Signalamplituden der noch fehlenden Probekörperseite, vergleichbar mit der Seitenansicht oder dem Querschnitt. B-, C- und D-Bilder sind immer von der Prüfrichtung abhängig. In Abb. 23 sind die bei der Auswertung der Ultraschallsignale üblichen Darstellungen zusammengefasst.

Bei dem Ultraschallechoverfahren sind materialbedingt kleinere Reflexionen an den anatomisch bedingten Inhomogenitäten zu finden. Es besteht daher ein mehr oder weniger intensiv ausgeprägtes Hintergrundrauschen, das die Selektion relevanter Echosignale erschwert.

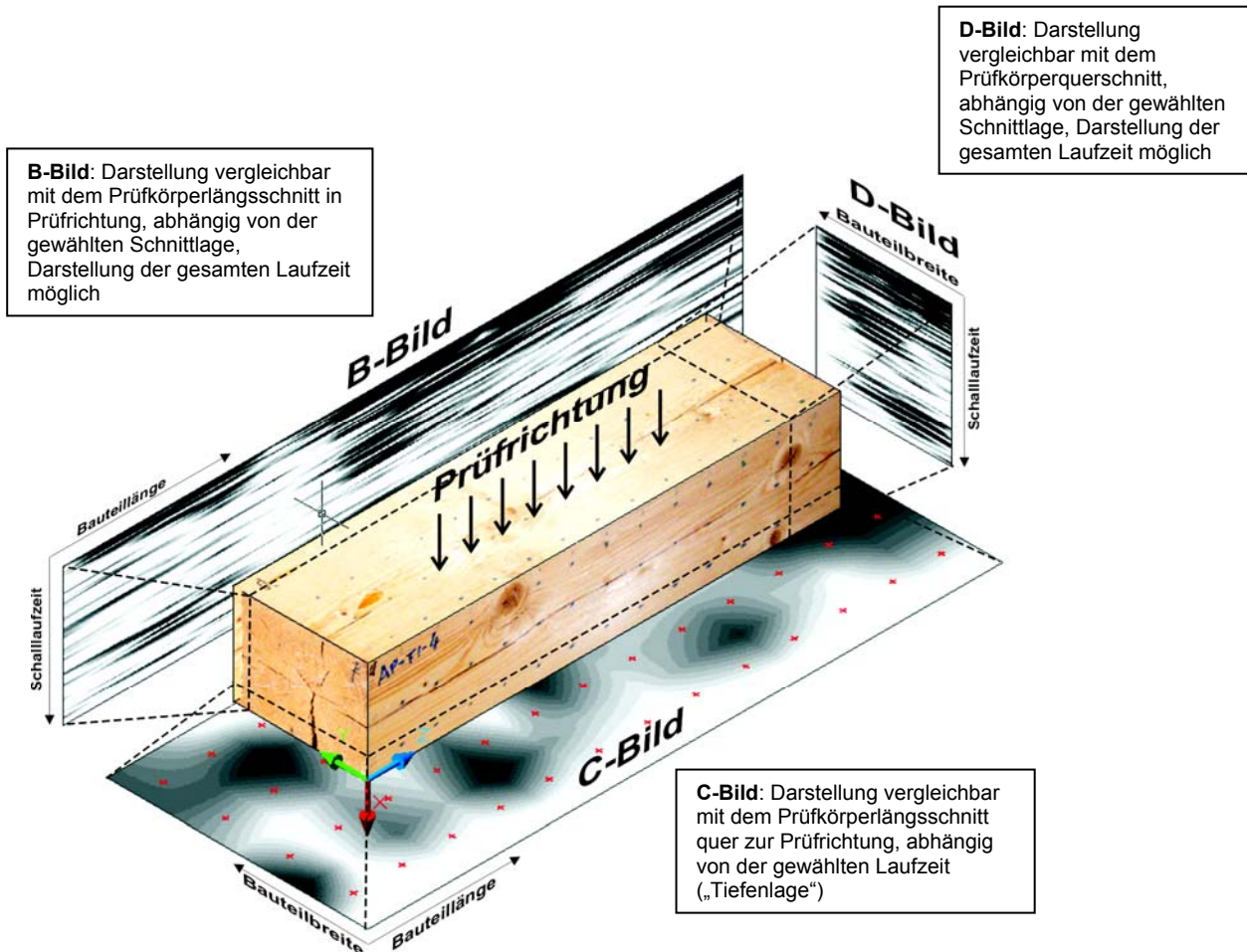


Abb. 23: Darstellung der Bezugsebenen in Abhängigkeit von der Prüfrichtung

5.2 Bohrwiderstand

Das zerstörungsarme Bohrwiderstandsverfahren besitzt wie auch das Ultraschallechoverfahren ein hohes und zum Teil nur unvollständig erforschtes Potenzial bei der Bewertung von Altholz. Das Gerät ist mobil einsetzbar und gehört seit einigen Jahren zu den etablierten Verfahren, die unterstützend bei der Baum- und Holzmastenkontrolle und zunehmend auch bei der Bauwerksprüfung eingesetzt werden.

Im folgenden Kapitel werden der aktuellen Stand der Literatur sowie Hinweise auf die verfahrenstechnischen Besonderheiten wiedergegeben.

5.2.1 Verfahren

Die Bohrwiderstandsmessung zählt zu den zerstörungsarmen Prüfverfahren und wurde bereits 1963 von H. Künzel zur Härteprüfung von Außenputzen vorgestellt [Winter und Held, 1996]. Für den dortigen praktischen Einsatz hat es sich nicht durchsetzen können. Darauf aufbauend wurde das Verfahren 1972 zur Ermittlung des Rohdichteprofils von Spanplatten eingesetzt und ab 1985 zur Anwendung an Holz weiterentwickelt. Heute ist das Gerät auch als Resistograph bekannt [Rug und Held, 1995], [Kraft und Pribbernow, 2006], [Kothe, 1986], [Rinn, 1993], [Görlacher und Hättich, 1990].

Aus den guten Praxiserfahrungen bei der Baumkontrolle abgeleitet, findet die Bohrwiderstandsmessung auch bei der Untersuchung bestehender Konstruktionen im Innen- und Außenbereich Verwendung. Durch den geringen Bohrlochdurchmesser und die direkte Auswertungsmöglichkeit wird das Verfahren überall dort eingesetzt, wo es auf eine möglichst geringe Beeinträchtigung der Konstruktion, aber auch auf eine schnelle Aussage vor Ort ankommt. Sowohl bei kerngeschädigten Hölzern, die durch die Klopfpfeife aufgrund ihrer Dicke oder Härte nicht mehr zuverlässig erfasst werden können als auch bei verdeckten und nicht direkt zugänglichen Bauteilen, können Aussagen zum Bauzustand getroffen werden. Bei dem Verfahren wird eine Bohrnadel mit konstantem Vorschub in das zu untersuchende Holz gebohrt und die dafür erforderliche Leistung des Antriebmotors aufgezeichnet. Der Bohrkopf der im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten Nadeln besteht aus zwei Schneiden seitlich einer Zentrierspitze, die das Abdriften verhindern soll. Die Bohrnadel besitzt im Allgemeinen eine Länge von 30 - 40 cm, kann aber auch bis zu 1 m oder darüber hinaus lang sein. Die Spitze mit den Schneiden ist 3 mm und der Schaft 1,5 mm stark (Abb. 24). Andere Nadelausbildungen sind möglich.

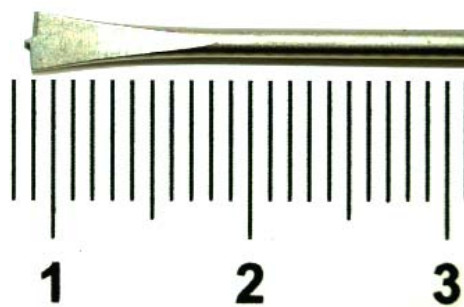


Abb. 24: Bohrnadel, Fa. IML

Das Verfahren beruht auf dem Grundsatz, dass die am Nadelkopf erforderliche Schneidarbeit proportional der Leistungsaufnahme bei stetig wachsendem Bohrweg ist. Bei hartem

Holz ist die erforderliche Leistungsaufnahme hoch, bei weichem oder geschädigtem Holz niedrig. Trifft die Nadel auf Fehlstellen oder Risse, sinkt der Widerstand schroff ab und steigt nach Wiedereintritt in das Material steil an. Bei pilzgeschädigtem Holz ist der Verlauf der Bohrkurve im Übergang vom gesunden zum geschädigten Bereich eher allmählich. Durch die Aufzeichnung des Bohrweges können neben der Schadenseinschätzung auch Rückschlüsse auf Bauteilabmessungen oder zimmermannsmäßige Holzverbindungen wie Zapfen oder Blattstöße [Hättich, 1990] gezogen werden. Auch zur Beurteilung von Wert- und Resonanzholz ist eine forstwirtschaftliche Anwendung möglich [Ziegenhals und Kluck, 2000]. Danach kann ein Teil der Resonanzholzmerkmale mittels Bohrwiderstand erfasst werden. Das Verfahren hat sich zudem bei vielen Kommunen etabliert, Straßen- oder Parkbäume hinsichtlich der an sie gestellten Anforderungen der Verkehrssicherheit zu überprüfen. Zum Teil werden Bohrwiderstandsmessungen auch an Spielplatzgeräten aus Holz durchgeführt. Bei der Holzmastenkontrolle (Telefon- oder Stromkabelmasten) gehört das Verfahren zum Standard. Die Bewertung der Messungen erfolgt subjektiv anhand der aufgezeichneten Bohrkurve, die durch die folgenden Einflussgrößen bestimmt wird.

5.2.2 Einflussgrößen

Die Bohrkurve wird von holzanatomischen und holzphysikalischen Einflüssen sowie von geräte- und verfahrenstechnische Besonderheiten bestimmt. Diese werden folgend dargestellt.

5.2.2.1 Rohdichte

Die Rohdichte schwankt von Holzart zu Holzart, aber auch innerhalb eines zu untersuchenden Balkenquerschnittes und innerhalb eines Jahrringes und führt dabei zu dem charakteristischen Verlauf der Aufzeichnungen und des Bohrniveaus mit entsprechenden Amplitudenausschlägen durch die veränderte erforderliche Bohrleistung. Durch die Rohdichtesprünge von Früh- und Spätholz werden die Jahrringe deutlich abgebildet (Abb. 25).

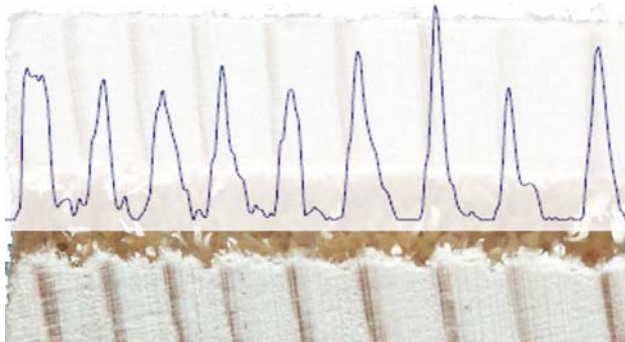


Abb. 25: Bohrkurve mit guter Jahrringerkennung

Eine höhere Rohdichte wird durch ein erhöhtes Bohrniveau registriert, so dass für die konkrete Messstelle eine Aussage zur Rohdichte prinzipiell möglich ist [Eckstein und Saß, 1994], [Rinn, 1992], [Rinn, 1994]. In [Görlacher und Hättich, 1990] wird dies unter Voraussetzung bestimmter Randbedingungen bestätigt. Es kann aus einer punktuell durchgeführten Messung jedoch nicht auf die Tragfähigkeit des Gesamtbauteiles geschlossen werden. Reaktionsholz kann dabei zur Verfälschung der Ergebnisse führen. Reaktionsholz resultiert aus der Reaktion des Baumes auf veränderte Krafteinwirkungen. Bei Nadelholz führt das zu

so genanntem Druckholz. Die im Vergleich zum normalen Gewebe erhöhte Rohdichte bewirkt keine im üblichen proportionalen Verhältnis steigende Festigkeit. Besonders deutlich nimmt die Rohdichte von Nadelhölzern mit dem Alter durch enger werdende Jahrringe hin zu den äußeren Stammbereichen zu. Das führt bei der Prüfung des Querschnittes von außen nach innen zum Bohrniveauabfall. Bei stark spannrückigem Holz wie Weißbuche kommt ein welliger Jahrringverlauf hinzu, so dass Wellenberge angebohrt werden und die Jahrringbreite bei der grafischen Auswertung verändert erscheint. Durch seine Größe bedingt, befindet sich der Bohrnadelkopf in der Regel gleichzeitig im Früh- und Spätholz eines Jahrringes. Die sich ergebende Bohramplitude ist damit Resultat aus dem höheren Widerstand des Spätholz- und dem geringeren Widerstand des Frühholzanteils. Der Effekt wird verstärkt, wenn die Nadel nicht senkrecht auf die Jahrringgrenze trifft. Eine differenzierte Jahrringanalyse ist im Fall enger adulter Jahrringe im Bereich $< 1,0$ mm dann schlecht möglich. Für dendrochronologische Untersuchungen ist das Verfahren somit nur begrenzt geeignet, da besonders bei adulten Stammabschnitten und damit engen Jahrringen die erforderliche Auflösung und scharfe Abgrenzung nicht erreicht wird. Noch weniger genau ist die Abgrenzung der Jahrringe, wenn der Bohrlochverlauf stärker von der radialen Orientierung abweicht und schräg durch das Spät- und Frühholz getrieben wird. In der Praxis vor Ort wird ein idealisiert radial verlaufender Bohrkanal nur selten realisierbar sein.

Bei harten ringporigen Hölzern bedingt der schroffe Wechsel von großporigem Frühholz zu dichtem Spätholz mit dem maßgebenden Anteil an Librifasern einen Peak bei der Darstellung der Bohrkurve. Im Übergangsbereich vom Frühholz mit großen tangential angeordneten Poren zum Spätholz, kann es bei hartem Eichenholz durch die vergleichsweise flexible Nadelausführung zum Ablenken der Nadel kommen.

Bei Zerstreutporern gibt es nur undeutliche Dichteunterschiede über den Jahrring, da nur wenige Reihen abgeplatteter und dickwandiger Fasern vorhanden sind [Eckstein und Saß, 1994] und detektiert werden müssen. Das Ablesen der Jahrringbreiten ist ab dem verkernten Bereich insbesondere bei ring- und halbringporigen Hölzern schwieriger. Die Verthyllung der Tracheen im Zuge der Kernbildung bei Eiche bewirkt nach [Eckstein und Saß, 1994], dass weniger Amplitudenminima auftreten.

5.2.2.2 Äste und Risse

Nach [Tobisch und Mittag, 1998] werden Äste ab einem Durchmesser von 30 mm durch Veränderung des effektiven Bohrwiderstandes erkannt. Verwachsene oder im Holzkörper befindliche Schwarzäste erzeugen aufgrund der höheren Rohdichte eine deutliche Amplitude. Nach [Tobisch und Mittag, 1998] steigt bereits ab einem Astdurchmesser von ca. 20 mm der Bohrwiderstand so deutlich an, dass eine Identifizierung eindeutig ist.

Bei kleinen Ästen einerseits ist die Wahrscheinlichkeit groß, daran vorbeizubohren und diese nicht festzustellen. Andererseits besitzen kleine Äste weniger Relevanz für die Festigkeitseigenschaften, was u. a. in die Sortierkriterien nach DIN 4074 eingeflossen ist.

Risse sind im Bohrprofil durch einen spontanen, steilen Abfall und späteren Anstieg der Kurve, im Abstand des durchbohrten Risses, erkennbar.

5.2.2.3 Feuchtigkeit

Das Bohrniveau bei feuchtem Holz ($\omega \approx 60 - 100 \%$) ist ungleich höher als bei trockenem Holz ($\omega \approx 10 \%$) [Eckstein und Saß, 1994] und wird damit begründet, dass die zu erwartende niedrigere Schnittleistung von dem mehr als fasergesättigtem Holz durch einen erhöhten Leistungsaufwand bei der Komprimierung der nassen Späne im Bohrkanal überschattet wird und damit die erforderliche Komprimierungsenergie maßgebend ist. Die anatomisch bedingten Schwankungen der Rohdichte werden mit steigendem Feuchtegehalt zudem weniger deutlich abgegrenzt. Die porenreicheren Frühholzbereiche nehmen oberhalb des Fasersättigungspunktes deutlich mehr Wasser auf als die Spätholzfasern. Somit erfolgt in gewissem Maß eine Angleichung der beiden Zonen und die im trockenen Zustand deutliche Abgrenzung zwischen Früh- und Spätholz ist nicht mehr zu beobachten.

5.2.2.4 Holzschädigungen

Dass die Bohrwiderstandsmessung zum Aufspüren von Defekten im Holz geeignet ist, wurde mehrfach bestätigt [Tobisch und Mittag, 1998], [von Laar, 2006], [Kothe, 1986], [Eckstein und Saß, 1994], [Rinn, 1992].

Bei mehr als 32 % Masseverlust durch Braunfäule und mehr als 40 % durch Weißfäule ist die Abnahme des Bohrwiderstandes deutlich erkennbar [Eckstein und Saß, 1994].

Nach [Tobisch und Mittag, 1998] fällt bei einer Schädigung von 10 % der Bohrwiderstand auf 55 % des Referenzwertes. Bei einer Schädigung von 30 % wurde eine Verringerung auf nur noch 20 % des Referenzwertes festgestellt. Für die zitierten Untersuchungen wurden Schädigungen von Fichtenholz durch Einbringen von Fehlstellen simuliert.

Die bei Weißfäule häufig hervorgerufene Marmorierung mit den dafür typischen schwarz bis kaffeebraunen Grenz- bzw. Abschottungslinien (siehe Abb. 13) führt in diesem Bereich zur Erhöhung des Bohrwiderstandsniveaus. Dies ist damit erklärbar, dass die Gefäße und teilweise die Faserlumina mit amorphen, granulären und tropfenförmigen Substanzen gefüllt sind. Diese Einlagerungen werden durch erhöhte Aktivität der Phenyloxidasen gebildet, die pilz- und baumeigene Inhaltsstoffe in krustierte und damit vergleichsweise harte Melanine umwandeln [Eckstein und Saß, 1994]. Die zum Teil gummiartige Konsistenz der Stoffe kann zum Abbremsen der Bohrnadel führen, so dass unter der Maßgabe eines konstanten Vorschubs eine erhöhte Leistungsaufnahme und damit eine Erhöhung des Bohrniveaus zu verzeichnen wäre. Eine partielle Steigerung des Bohrwiderstandes vor dem geschädigten Bereich ist demnach zu erwarten. In Tab. 6 ist die Veränderung des Bohrwiderstandes bezüglich einzelner Qualitätskriterien am Beispiel von Fichte nach Angaben in [Tobisch und Mittag, 1998] dargestellt.

Tab. 6: Änderung des Bohrwiderstandes ausgewählter Kriterien für Fichte [Tobisch und Mittag, 1998]

Kriterium	effektiver Bohrwiderstand [%]
ohne Schädigung	100
Äste 20 mm	100
Äste 30 mm	130
Fäule 10 %	50
Fäule 30 %	20

5.2.2.5 Bohrtrend

Beim Einbohren in das Holz wird der aufgezeichnete Widerstand zunächst von einem niedrigen Ausgangsniveau, resultierend aus der Leerlaufspannung, ansteigen. Zu Beginn wird das Bohrmehl nach außen transportiert und eine Schaftreibung tritt zunächst nicht auf. Mit zunehmender Bohrtiefe steigt die Leerlaufspannung jedoch an, da der Einfluss der sich um die Nadel befindlichen Bohrspäne im Bohrkanal deutlich wird und die Späne durch den glatten Schaft nicht abgeführt werden. Diese Reibung führt zu einem leichten Anstieg des Bohrniveaus und wird als Bohrtrend bezeichnet. Das Niveau der Leerlaufspannung liegt somit zu Beginn der Bohrung niedriger als am Ende. Beim Durchbohren dichter Bereiche reicht der Stauraum von 75 % nicht mehr aus, um die Bohrspäne im elastischen Bereich an den Nadelschaft zu drücken, zudem muss mehr Leistung aufgebracht werden, wenn feuchtes Bohrmehl komprimiert wird. Ein Bohrtrend kann vorher nicht abgeschätzt werden und auch nicht direkt im Bohrdiagramm quantifiziert werden. Bei der Auswertung muss dieser Effekt dennoch qualitativ beschrieben werden. Wird dasselbe Probestück von der gegenüberliegenden Seite durchbohrt, kann der verfahrensbedingte bzw. strukturell bedingte Trend bewertet werden.

5.2.2.6 Verlaufen

Trifft die Nadel auf Inhomogenitäten, kann es zum Abdriften bzw. Verlaufen der dünnen elastischen Bohrnadel kommen. Das ist möglich bei Auftreffen auf Astbereiche oder Reaktionsholz, auf drehwüchsiges Holz aber auch bei starkem Dichtewechsel zwischen Früh- und Spätholz und insbesondere bei starker Abweichung von der radialen in die tangential Bohrrichtung. Bei unebener oder zu schmaler Aufstandsfläche kann es zum Verwackeln und damit Verkanten der Nadel kommen. Sie weicht dann vom idealen geradlinigen Bohrweg ab und beschreibt einen entsprechend gekrümmten Weg, so dass vom Verlaufen gesprochen wird. Durch die Krümmung erhöht sich die erforderliche Bohrenergie aufgrund der zusätzlichen Reibung der Nadel an der Krümmungsfläche der Bohrwandung. Die Messkurve verbleibt dann auf höherem Niveau und verstärkt den Bohrtrend.

5.2.2.7 Verdrillung

Der Widerstand vom Zeitpunkt des Auftreffens der Nadel auf das Holz bis zum Einsetzen des Schneidvorganges bewirkt einen Anstieg des Bohrniveaus, da durch die elastische Bohrnadel ein Teil der Rotationsenergie abgepuffert wird. Bevor der Schneidvorgang einsetzt, wird von der Seite des Gerätes selbst das Drehmoment eingeleitet und bis zum Erreichen der erforderlichen Schneidenergie in Form der Verdrillung (Tordieren) der Bohrnadel aufgebaut. Die Energie zur Überwindung der Oberflächenspannung an der Holzoberfläche oder an Dichtesprüngen ist größer als die notwendige Energie während des Schneidvorganges. Damit kann nach Einsetzen des Schneidvorganges ein Teil des aufgebauten Drehmomentes über die elastische Rückformung der Nadel abgebaut werden. Die einzubringende Energie sinkt für diesen kurzen Zeitraum. Im Ergebnis sind unterschiedlich starke Ausschläge der Bohrnadel zu erkennen. Besonders in hartem Holz verdrillt die Bohrnadel eher und speichert für kurze Zeit einen Teil der Motorenergie und gibt sie verzögert wieder ab, so dass die Messwerte beeinflusst werden.

5.2.2.8 Abnutzung

Mit zunehmender Untersuchungsanzahl werden die Schneide und die Zentrierspitze des Bohrnadelkopfes abgenutzt. In Folge der Abnutzung ist die Bohrniveaudarstellung weniger scharf und führt zu einer Glättung der Bohrkurve.

Beim schrägen Auftreffen des abgenutzten Nadelkopfes auf den Jahrring ist zusätzlich mit einem Verlaufen der Bohrnadel durch die geringere Schnittleistung der äußeren geschliffenen Schneidenkanten und durch die geringere Wirksamkeit der Zentrierspitze zu rechnen. Je nach durchbohrtem Material und Querschnitt ist die Nadel nach 50 - 60 Messungen bei harten Hölzern und 100 - 130 Messungen bei weichen Hölzern (Nadelhölzer) auszutauschen.

5.2.3 Messdarstellung

Aus dem Stromverbrauch des Antriebmotors bzw. aus dem Torsionsmoment, welches auf das Bohrgetriebe wirkt, wird die abgerufene Leistung gemessen und aufgezeichnet. Durch das Rückstellmoment des Getriebes wird ein Metallstift mitgeführt, der die Messgrößen maßstäblich in einen Wachspapierstreifen ritzt.

Bei dem elektronischen Gerätetyp wird die Spannungsaufnahme des Motors gemessen und über der Eindringtiefe aufgezeichnet. Durch das Abtasten des Antriebzahnrades der Gewindespindel wird ein Signal erzeugt, das alle 1/10 Millimeter bzw. alle 1/100 Millimeter Vorschub erfasst wird. Über eine elektronische Schnittstelle können die Daten zur weiteren Verarbeitung und Archivierung übergeben werden. Bei geringerer Vorschubgeschwindigkeit wird die Messauflösung verfeinert. Die Möglichkeit, die Vorschubgeschwindigkeit zu verändern, ist nicht bei allen verfügbaren Geräten möglich und kann den Austausch der Gewindespindel mit reduzierter Gewindesteigung erfordern. Neuere Gerätetypen kalibrieren den Vorschub selbst.

Der Messwert selbst setzt sich aus der Stromaufnahme im Leerlauf und der zusätzlichen Spannung, die durch Zerspanungs- und Verdrängungsarbeit der Nadelspitze und der Reibung des Schaftes resultiert, zusammen. Unter bestimmten Bedingungen entspricht dieser der lokalen Rohdichte [Rinn, 1992], [Ehlbeck und Görlacher, 1990].

Der in [Rinn, 1992] angegebene Bohrwiderstand aus der Summe von Schaffreibung, Zerspanungs- und Verdrängungsarbeit kann aufgrund der vorgenannten Einflussgrößen wie folgt erweitert werden:

$$Bw = [P_{Bw0} + P_S + P_V + P_R(x)] \cdot \eta_{Bw} \quad \text{Gl. 5-6}$$

mit:	Bw	Bohrwiderstand
	P_{Bw0}	Leerlaufleistung im Freilaufbetrieb
	P_S	Schnittleistung am Nadelkopf
	P_V	Leistung zur Spanverdrängung nach dem Schnitt
	$P_R(x)$	Laufleistung im Bohrloch in Abhängigkeit vom Bohrweg x
	η_{Bw}	geräteabhängiger Faktor

Die Leerlaufleistung P_{Bw0} ist vom Gerätetyp und von dessen technischer Ausführung abhängig und schwankt je nach Abnutzungs- und Wartungsgrad aufgrund von Reibung und Lagerschmierung. Die Leerlaufleistung beinhaltet ebenso den erforderlichen Arbeitsaufwand zur Realisierung des Vorschubs. Das aus dem Leerlauf resultierende Amplitudenniveau wird bei den heute verfügbaren Geräteversionen ausgeblendet, so dass nur die Erhöhung des Niveaus erfasst wird. Die Schnittleistung P_S am Bohrkopf variiert mit der Holzart, der Rohdichte, der Bohrrichtung, der Feuchtigkeit, der Temperatur sowie der Abnutzung der Schneiden. Nach dem Spanabhub verbleibt das Material im Bohrkanal, so dass P_V die erforderliche Leistung bei der Verdrängung der Späne in freigebohrte rückwärtige Bereiche und deren Komprimierung beschreibt. Die dafür erforderliche Arbeit ist abhängig von der Holzart, der Rohdichte und der Feuchtigkeit. Nachdem der Spantransport und die Erstkomprimierung erfolgt sind, wird ein Leistungsanteil zur quasiständigen Komprimierung benötigt. Der Arbeitsaufwand, mit welchem sich die Späne im Bohrloch um den Nadelschaft komprimieren lassen und die Größe der Kontaktfläche bestimmen die Laufleistung im Bohrloch. Mit Zunahme des Bohrweges vergrößert sich die Kontaktfläche entsprechend, so dass die Integration über der Leistungsfunktion $P_R(x)$ vom Eintritt der Nadel bis zur Stelle x_i erfolgen muss. Die Laufleistung im Bohrloch erhöht sich durch Verkanten oder beim Durchbohren von dichterem und damit schwerer komprimierbarem Holz (z. B. Äste). Der Faktor η_{Bw} bestimmt die auswertbare Amplitude. Je nach Gerätetyp und dessen Konfiguration kann direkt Einfluss auf die Größe des Bohrwiderstandes genommen werden.

Die Summe der hier dargestellten Einzelkomponenten und die Einflüsse vorgenannter verfahrensbedingter Kriterien führen zum Bohrwiderstandsdiagramm in Form von Amplitudenpeaks, die über den Bohrweg dargestellt werden können (Abb. 26).

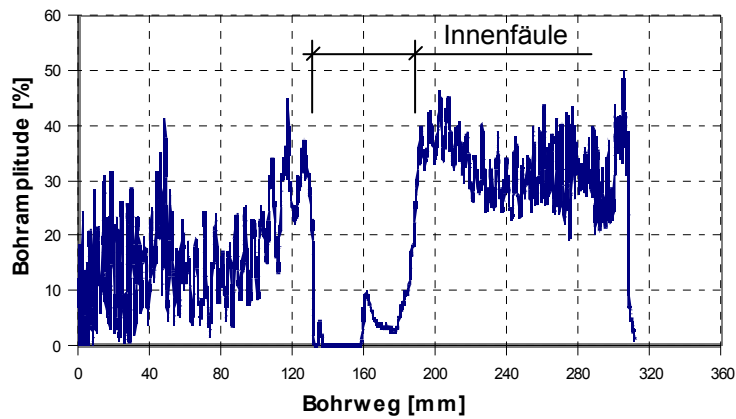


Abb. 26: Bohrdiagramm eines Kiefern balkens mit Innenfäule

Der Erfolg der Bohrwiderstandsuntersuchungen setzt Fachwissen und Erfahrung des Anwenders voraus, denn verfahrens- oder anwenderbedingte Fehler können zu Fehlinterpretationen führen.

Die Auswertung muss unter komplexer Betrachtung oben genannter Fehlerquellen erfolgen. Einerseits ist der Einfluss aus den anatomischen Eigenheiten des Holzes zu berücksichtigen, andererseits müssen bei der Messdurchführung die richtigen Einstellungen gemäß Holzart gewählt werden.

Da punktuelle Messungen durchgeführt werden, sind die Aussagen nur für einen örtlich begrenzten Bereich gültig.

Bei der Anwendung führen Bewegungen am Gerät zum Verkanten oder die Veränderung des Anpressdruckes zur Veränderung des Leistungsbedarfs der Vortriebseinheit und damit der Amplitude und des Bohrniveaus.

6 Methodik und Ergebnisse

6.1 Methodik der Prüfkörpererfassung und Statistik

6.1.1 Probengewinnung

Ausgangsbasis des Versuchsplanes stellten Schnitthölzer der Sortierklasse S 10 dar (folgend als Neuholz bezeichnet). So standen jeweils vier Probekörper von Fichte, Kiefer und Lärche mit den Maßen $l / b / h = 70 / 15 / 20$ [cm] zur Verfügung. Zunächst wurden die geometrischen und technischen Kennwerte der Balken aufgenommen und ein Prüfraster für die Bohrwiderstands- und Ultraschallechomessungen aufgetragen. Die Lagerung unter definierten klimatischen Bedingungen ermöglichte die Untersuchung bei variierenden Feuchtegehalten. Ausgewählte Balkenabschnitte wurden im Anschluss zur Herstellung von Prüfprismen verwendet und die Biegefestigkeit, der Biege-E-Modul, die Druckfestigkeit sowie die Schlagbiegefestigkeit ermittelt. Abb. 27 zeigt beispielhaft einen Lärchenbalken und dessen Einschnitt. Der Einschnitt und die Dokumentation ermöglichten später eine genaue Zuordnung zum Gesamtbauteil. Die Tabellen A-40 und A-41 im Anhang geben einen Überblick, welche Prüfungen an den Balkenabschnitten bzw. den daraus hergestellten prismatischen Prüfkörpern vorgenommen wurden.



Abb. 27: Balkenabschnitt vor (links) und nach (rechts) dem Einschnitt

Die Ergebnisse der Prüfungen der Neuholzer sollen mit ungeschädigten und geschädigten Althölzern verglichen werden. Die 46 Altholzbalken (Nadelholz) stammten aus Objekten, die saniert oder gänzlich abgebrochen wurden. Deren Alter wurde, soweit möglich, nach Archivrecherche ermittelt. Die Entnahme der bis zu mehreren hundert Jahre alten Konstruktionshölzer erfolgte im Objekt selbst oder nach Abbruch durch beteiligte Unternehmen. Zur Auswahl kamen Deckenbalken, Sparren oder Lagerhölzer, die einerseits intakt und andererseits teilweise über den Querschnitt geschädigt waren und denen eine gewisse Resttragfähigkeit unterstellt wurde. Diese Auswahl fand unter dem Gesichtspunkt statt, dass deren Tragfähigkeit für eine Weiterverwendung ausreichen könnte. Nach der geometrischen und technischen Dokumentation wurden einige der Altholzbalken in Originalabmessung auf ihre Biegefestigkeit und den zugehörigen E-Modul hin als Gesamtbauteil im Aufspannfeld überprüft.

6.1.2 Geometrische Erfassung

Die Dokumentation dient der nachträglichen Reproduzierbarkeit von anatomisch-geometrischen und im Zuge der Prüfung auch technisch-mechanischen Eigenschaften der Balken. Insbesondere bei der hier gewählten Vorgehensweise, bei der nach der Prüfung die

Balken für die Herstellung von Prismen zerschnitten wurden, hat die nachvollziehbare Probendokumentation große Bedeutung.

Zunächst wurde nach einer Möglichkeit gesucht, die zur Prüfung vorgesehenen Bauteile so zu dokumentieren, dass auch nachträglich geometrische Kennwerte, aber auch anatomisch-physikalisch bedingte Inhomogenitäten wie Äste, Risse quantitativ überprüft werden können. In der Architektur und Denkmalpflege werden seit wenigen Jahren so genannte Entzerrungen durchgeführt, bei der quasiorthogonale Fotos aus den perspektivischen Digitalfotos errechnet werden. Dafür wurden Probekörper zunächst händisch vermessen und über Aufnahme von Passstrecken für eine digitale Weiterverarbeitung entzerrt, um optisch erfasste Anomalien auch nachträglich überprüfen zu können. Die Skalierung wurde dem Original angepasst, so dass die Überprüfung von Geometrien oder Inhomogenitäten nicht nur qualitativ, sondern auch im CAD-System quantitativ möglich war. Dafür wurde ein über das Pixelbild gelegtes Entzerrungsgitter dem Grad der perspektivischen Verzerrung angepasst und anschließend über Passstrecken skaliert verknüpft (Abb. 28). Die so erhaltenen Abbildungen konnten bei Bedarf über dreidimensionale Anordnung in einem CAD-System als visualisierte Probekörper dargestellt und beispielsweise Astverläufe oder andere anatomisch-geometrische Besonderheiten reproduziert werden (Abb. 29). Von Vorteil erwies sich diese Dokumentationsart bei der Bohrwiderstands- und Ultraschallechomessung, da mehrere Ansichten gleichzeitig betrachtet werden konnten und der räumliche Zusammenhang klar nachvollziehbar wurde.

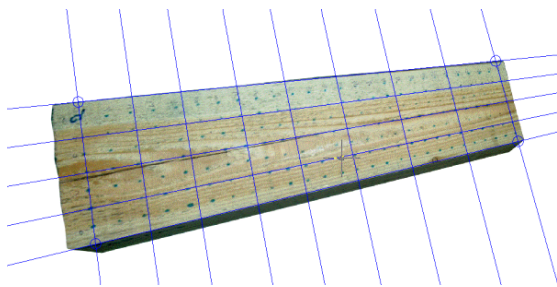


Abb. 28: Entzerrungsgitter über dem perspektivischen Digitalfoto

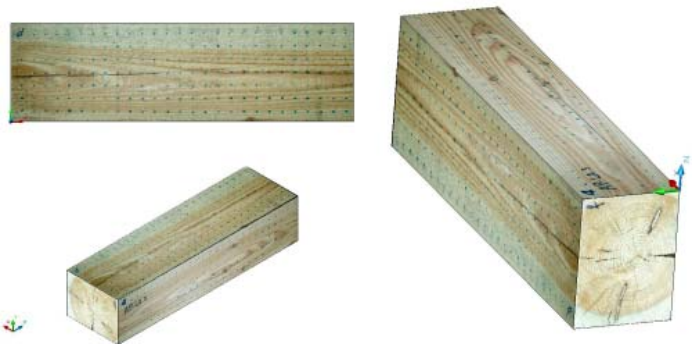


Abb. 29: Entzerrter, skaliertes und visualisierter Prüfkörper im CAD

6.1.3 Technische Kennwerte

Holzart. Die primären Merkmale der Holzarten dienen der Einstufung in die Nomenklatur, so dass das Vorkommen, die Häufigkeit, die Verteilung, die Form und die Größe von Strahlen- und Axialparenchym, Harzkanälen und Poren, aber auch die Masse, die Kern- bzw. Splintfarbe, die Jahringausbildung oder der Geruch Hinweise auf die vorliegende Holzart geben. Die Probekörper wurden am Handstück bzw. mit optischen Hilfsmitteln wie Lupe und ggf. Auflichtmikroskop eingeordnet.

Feuchtigkeit. Der Feuchtegehalt ω wurde nach DIN EN 13183-1 im Darrverfahren ermittelt (dazu Gl. A-13 im Anhang).

Ergänzend wurde bei einigen Balken die Bestimmung des Feuchtegehaltes nach DIN EN 13183-2 mittels elektrischem Widerstandsverfahren durchgeführt. Die ermittelten Werte, bei Einzelprüfkörpern mindestens drei Messungen, sind im Bereich von

$\omega = 7\%$ bis $\omega = 30\%$ nach EN 13183-2 anwendbar und wurden nicht für die Berechnung der Rohdichte verwendet, da sie vorrangig der Ermittlung der Größenordnung des Feuchtegehaltes bei der Klimalagerung dienten. Zum Einsatz kam das Gerät „Pocket 3“ des Herstellers Lignomat GmbH mit Rammelektrode (Abb. 30). Durch den Austausch verschieden langer Elektrodenspitzen kann die Einschlag- und die theoretische Messtiefe variiert werden. Das Gerät kam dann zum Einsatz, wenn verschiedene Messungen vor Ort durchgeführt wurden.



Abb. 30: Elektrisches Feuchtigkeitsmessgerät „Pocket 3“ mit Rammelektrode

Rohdichte. Die Rohdichte wurde bei den Balken durch Proben (Stückproben, Bohrkerne) und soweit Schwindrisse nicht vorhanden waren, über die Geometrie und die Masse des Balkens selbst bestimmt. Die Prüfung und Probennahme erfolgte so, dass diese repräsentativ die Grundgesamtheit unter Berücksichtigung aller bekannten oder vermuteten Einflussgrößen auf die Verteilung der Festigkeit und Steifigkeit darstellten. Die Rohdichte der Prismen wurde einzeln ebenso durch Ausmessen und Wägung errechnet. Grundlage ist die DIN 52182 (dazu Gl. A-14 im Anhang).

Soweit die Proben nicht bis zur Massekonstanz bei Normklima von 65 % relativer Luftfeuchte und 20 °C gelagert wurden, erfolgte von $\omega = 0\%$ bis $\omega = 18\%$ eine Umrechnung nach DIN EN 384 und für $\omega > 18\%$ nach DIN 52182 (dazu Gl. A-15 und Gl. A-16 im Anhang).

Ästigkeit. An den Konstruktionshölzern wurde die Ästigkeit nach DIN 4074-1 ermittelt (dazu Gl. A-17 im Anhang). Die Ästigkeit drückt den durch einen Ast belegten Prozentsatz einer projizierten Seite aus. Sie war aufgrund der Biegeprüfungen der Balken auf deren Zugseite von besonderem Interesse.

Zwischen verwachsenen und nicht verwachsenen Ästen sowie Astlöchern wurde nicht unterschieden.

Mittlere Jahrringbreite. Die mittlere Jahrringbreite resultiert aus einer radial angelegten Messachse und dem Auszählen der darauf befindlichen Jahrringe. Von der Messachse wurde der dem Mark am weitesten entfernte Punkt erfasst. Wenn nicht anders möglich oder um dem statistischen Einfluss besser gerecht zu werden, wurden bei Bedarf zwei Messachsen in unterschiedliche radiale Richtungen gelegt und summiert (dazu Gl. A-18 im Anhang). Gemäß DIN 4074-1 bzw. DIN EN 1310 wurde der Juvenilbereich mit einem Durchmesser von 50 mm bei den geprüften Hölzern mit Markröhre nicht berücksichtigt.

Schwindrisse. Die Risttiefe des Einzelrisses ist als Mittelwert bei Rissen $> 1,0\text{ m}$ bzw. $> 1/4$ der Balkenlänge zu bestimmen. Der Mittelwert ergibt sich aus drei Einzelmessungen in den Viertelpunkten des axial verlaufenden Radialrisses mit einer Fühlerlehre. Die maximale Risttiefe wird dabei auf die zugehörige Querschnittseite bezogen (dazu Gl. A-19 im Anhang). Die normengerechte Anwendung wurde für die Nachsortierung eingesetzt. Berücksichtigung finden gemäß der Definition nur radial verlaufende Risse. Im Fall beidseitiger Risse werden

zwei maximale Risstiefen projiziert. Die Tiefen von Endrisen können an der Querschnittseite abgenommen werden.

Zur Untersuchung des Risseinflusses auf die gewählten Messverfahren wurde das Messraster verdichtet und auf die Mittelwertbildung verzichtet.

Faserneigung. Die Faserneigung kann nach den Schwindrisen oder gemäß DIN EN 1310 nach dem Jahrringverlauf gemessen werden. Sie errechnet sich aus einem gedachten rechtwinkligen Dreieck, bei dem der Verlauf der Faser die Hypotenuse darstellt. Faserabweichungen, die aus der Anlage von Ästen herrührten, bleiben unberücksichtigt.

Weitere Kenndaten. Weiterhin fanden bei der technischen Dokumentation Markröhre, Baumkanten, Krümmungen, Sondergewebe, Verfärbungen sowie biotische und abiotische Schädigungen Berücksichtigung.

6.1.4 Nachsortierung

DIN 4074 mit den Teilen 1 bzw. 5 gibt Sortierregeln vor, die gemeinsam mit der Rohdichte die Grundlage für die Einstufung in eine Festigkeitsklasse und die Auswahl der Bemessungswerte darstellen. Hintergrund der sich im Vergleich zu den im Labor geprüften Prismen ergebenden großen Sicherheiten ist, dass nicht die absolute Bruchspannung, sondern deren Streuung durch Inhomogenitäten berücksichtigt wird. Nach den oben genannten Sortierkriterien wurde eine visuelle Sortierung der Konstruktionshölzer entsprechend den normativen Vorgaben für Nadelholz nach S 7, S 10 und S 13 vorgenommen. Die Sortiernorm trifft genau genommen nur auf Schnittholz zu. Im Rahmen der Arbeit wurden allerdings auch handbehauene Altholzbalken auf Grundlage der Norm nachsortiert.

Einige der Sortierkriterien sind bei der Nachsortierung von Altholz weniger relevant, wie das Vorhandensein der Markröhre, da die verwendeten Prüfbalken eine Breite > 12 cm besaßen. Vorhandene Baumkanten wurden abweichend nicht als Sortierkriterium angesetzt, da im Zuge einer exakten Querschnittserfassung der individuelle Querschnitt ermittelt und damit die durch Baumkanten reduzierte Querschnittsfläche berücksichtigt werden konnte.

Voraussetzung war, dass der in Ansatz gebrachte Querschnitt nur tragfähige Holzstruktur, also keine bast- und borkenhaltigen Anteile aufweist.

Wie auch in [Lißner und Rug, 2005] bestätigt wird, können Krümmungen, die hauptsächlich beim Trocknen des Holzes entstehen, für Altholz als Sortierkriterium unberücksichtigt bleiben. Die Verformungen wurden erfasst und können bei der Betrachtung der Gebrauchstauglichkeit einfließen.

Die Aussonderung der geschädigten Althölzer aufgrund von Pilzschäden erfolgte zielstellungsgemäß nicht.

Um eine Verwechslung mit den Sortierklassen nach DIN 4074 zu vermeiden, wird ein tiefgestelltes Kürzel („R“) eingeführt, so dass die Sortierklassen mit $S_R 7$, $S_R 10$ bzw. $S_R 13$ angegeben werden.

6.1.5 Schadensübergangsbereich

Der Übergang von gesundem zu geschädigtem Material war von besonderem Interesse. Die Schädigung durch holzerstörende Pilze verläuft fortschreitend und richtungsabhängig von einem Befallsherd ausgehend. In der Initialphase erfolgt die Substratbesiedlung mit zunächst optisch kaum wahrnehmbarer Holzerstörung und erst mit fortschreitender Befallsdauer werden die länger besiedelten Substratpartien durch enzymatische Prozesse intensiv in körpereigene Stoffe umgewandelt (vgl. 3.2.2). Die Befallsschwere mit entsprechenden strukturell-anatomischen Folgen variiert über dem Bereich von völlig zerstörter Substanz über die besiedelten Bereiche hin zu ungeschädigt erscheinenden Partien außerhalb der Reichweite der Hyphen. Mit den gewählten Prüfverfahren sollte untersucht werden, ob eine Differenzierung des Befallsgrades möglich ist. An ausgewählten Balkenabschnitten wurde der Übergangsbereich durch Rasterverdichtung mit einem Rastermaß von 1,25 cm definiert (Abb. 31).

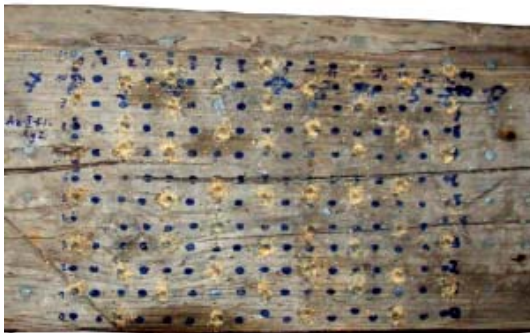


Abb. 31: Verdichtetes Prüfraster im Übergangsbereich eines geschädigten Balkens

Zur Beurteilung von Festigkeitsparametern wurden aus den Übergangszonen Probekörper geschnitten und wie vorgenannt unter Berücksichtigung der Normen geprüft.

Die Einhaltung der in DIN 52186 geforderten Prüfkörperlänge von $l = 18 h_{\text{Prüfkörper}}$ konnte aufgrund von Ästen, Rissen, Nagellöchern oder Holzschäden nicht immer eingehalten werden.

Die geschädigten Bereiche wurden individuell in drei Schadenszonen eingeteilt. Als Zone 1 wird der optisch intakt erscheinende Bereich definiert. Die Zone 2 ist der Übergangsbereich zum geschädigten Holz mit leichten Verfärbungen ohne sichtbare strukturelle Schäden. Die Zone 3 beschreibt den Bereich der stärksten Schädigung und wurde unter dem Aspekt gewählt, dass eine Resttragfähigkeit vorhanden ist und die Bruchfestigkeit des Gesamtbau- teiles anteilig positiv beeinflusst wird. Die aus der Zone 3 gewonnenen Probekörper mussten ausreichend formstabil sein, um mit ihnen arbeiten und sie mit den Maschinen prüfen zu können.

Die Abb. 32 und Abb. 33 zeigen die Einteilung in die Zonen anhand eines durch Echten Hausschwamm geschädigten Kiefernholzes, aus dem Probekörper geschnitten wurden (Abb. 34). Es ist zu erkennen, dass einige Prismen nicht nur innerhalb einer Zone lagen. Das trifft für die Prismen über den Querschnitt und die Länge zu. Die Einstufung wurde für den dominierenden Anteil der Schadenszone jedes Prüfkörpers als Basis für die jeweilige Prüfung vorgenommen.



Abb. 32: Geschädigter Querschnitt

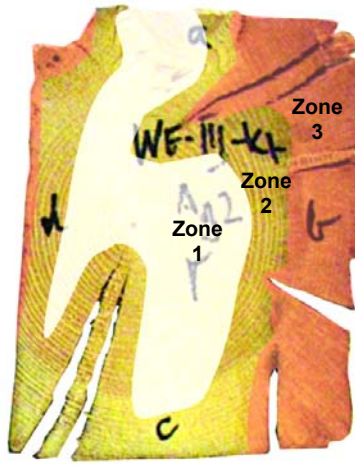


Abb. 33: Geschädigter Querschnitt mit Zonen für die Probennahme



Abb. 34: Prismenherstellung mit Zonen

6.1.6 Angewandte statistische Methoden

Die für die statistischen Analysen verwendeten Gleichungen sind im Anhang im Kapitel A 1.1 zu finden.

Die aus den Prüfungen gewonnenen Datensätze wurden statistischen Auswertalgorithmen unterzogen. Über den arithmetischen Mittelwert \bar{x} der Messreihe wurde u. a. die empirische Standardabweichung s ermittelt. Sie wird aus der Summe der quadrierten Abweichungen der Einzel- bzw. Merkmalswerte vom arithmetischen Mittel gebildet und durch den um eins verringerten Stichprobenumfang dividiert. Um die Streuung der verschiedenen Messreihen und Untersuchungsparameter besser bewerten zu können, wird auf den Variationskoeffizienten v zurückgegriffen. Die Streuung wird dadurch auf die Lage der mittleren Verteilung bezogen und kann so gut mit anderen Stichproben verglichen werden. Auf Grundlage der Standardabweichung wurde die Normalverteilung der Stichprobe abgeschätzt. Das erfolgte mit der Ermittlung der „3 s-Grenzen“ gemäß der Gl. A-12 im Anhang. Die Messwerte sollten sich innerhalb dieser Grenzen befinden, um die Normalverteilung nicht auszuschließen. Befinden sich Werte außerhalb, stammen die bewerteten Daten wahrscheinlich nicht aus einer normalverteilten Grundgesamtheit. Nach dem Gauß'schen Fehlerintegral liegen 99,7 % aller Messwerte im Bereich von $\pm 3 s$.

Den mathematisch-statistischen Methoden wie der Regressionsanalyse, kommt bei der Auswertung von empirisch gewonnenen Daten zur Ermittlung von Beziehungen unabhängig voneinander geprüften Kenngrößen besondere Bedeutung zu. Der inhomogene und anisotrope Baustoff Holz führt zu Messwertabweichungen, die über eine Vielzahl von zusätzlichen Messungen relativiert werden müssen. Der Korrelationskoeffizient r stellt als statistische Maßzahl Zusammenhänge zwischen verschiedenen Messreihen auf Basis einer empirischen Funktion her. Die Gerade der unmittelbaren linearen Regression wird in der üblichen Form $y = a + bx$ angegeben. Die Faktoren a und b sind dabei so zu bestimmen, dass die Summe der Quadrate der Abweichungen (Residuen ε) der Werte der geschätzten Gerade (\hat{y} -Werte) und der gemessenen Werte möglichst klein ist (Methode der kleinsten Quadrate). Der Zusammenhang der zugrunde liegenden Daten ist umso strenger, je näher sich der Absolutwert des Korrelationskoeffizienten dem Betrag 1 annähert. Nach [Zwerenz,

2006] besteht bei Werten von $r \leq 0,3$ ein schwacher, bei $0,4 \leq r \leq 0,7$ ein mittelgroßer und bei $r > 0,8$ ein starker bzw. strenger Zusammenhang. Für die so ermittelten stochastischen Zusammenhänge ist eine Umstellung oder Umkehrbarkeit nicht möglich. Das Quadrat des Korrelationskoeffizienten wird als Bestimmtheitsmaß B bezeichnet. Es gibt den Anteil der Gesamtstreuung an, welcher durch die Regressionsfunktion erklärt werden kann.

Um mehrere Eingangsparameter zu betrachten, die jeweils einen eigenen Einfluss auf y_i haben, wurden multiple lineare Regressionsanalysen durchgeführt. Nach [Sachs und Hedderich, 2006] kann das Modell der multiplen linearen Regression nach Zusammenstellung im Anhang Gl. A-7 beschrieben werden.

Die Qualität dieser Vorhersage wird wieder durch das Bestimmtheitsmaß bzw. dem Korrelationskoeffizienten (hier Kürzel „m“) abgeschätzt. Dieser fällt im Sinne eines Zusammenhanges umso besser aus, je genauer ein zu ermittelnder Koeffizient β_i des Polynoms angepasst werden kann. Bei der mittelbaren Regressionsanalyse werden das multiple Bestimmtheitsmaß, daraus der multiple Regressionskoeffizient und die Reststandardabweichung bzw. -varianz ermittelt und zur Bewertung der Analyse verwendet [Häselbarth, 1985], dazu Gl. A-11 im Anhang. Die statistische Bewertung jeder unabhängigen Variablen wurde über einen t-Test realisiert. Auf dieser Basis erfolgte nach Hinzuziehen oder Ausschluss die Auswahl der unabhängigen Variablen.

Die Ergebnisse der Untersuchungen werden in Ihrer Zuverlässigkeit durch Versuchsfehler beeinträchtigt. Die Versuchsfehler können einerseits systematische Fehler sein, die durch Unzulänglichkeiten in der Apparatur, der Methode oder der manuellen Durchführung verursacht werden. Andererseits erzeugen Schwankungen der Einflussgrößen und des Messprozesses zufällige Fehler. Dem gegenüber steht das Modell, das selbst fehlerhaft angenommen worden sein kann. Zur Überprüfung des Modellfehlers (Abweichung des verwendeten Modells von der Realität) werden Adäquatheitstests nach [Scheffler, 1973] durchgeführt. Dafür wird der Quotient aus dem Anpassungsdefekt und der Versuchsstreuung ($F_{\text{exp.}}$) mit dem zugehörigen Tabellenwert ($F_{\text{Tab.}}$) verglichen. Das Modell ist adäquat, wenn $F_{\text{Tab.}}$ signifikant, also größer als $F_{\text{exp.}}$ ist.

6.2 Ultraschallecho

Das Ultraschallechoverfahren soll als unterstützendes Verfahren bei der geometrischen und technischen Analyse genutzt werden. Besonders interessant sind dabei die baustoffspezifischen Eigenschaften in Bezug auf die Schalllaufzeit. Mit deren Kenntnis können unbekannte Bauteilgeometrien ermittelt werden, wenn eindeutige Echosignale empfangen werden. Wie in 6.1.3 dargestellt, spielt die Nachsortierung eine wichtige Rolle bei der Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Konstruktionen. Verdeckt liegende Bauteile lassen sich visuell nur durch Freilegungen beurteilen. Die Möglichkeiten, Ultraschallecho als Unterstützung zur Ermittlung von Ästen oder Rissen für die Sortierung, aber auch für die Schadensdifferenzierung einzusetzen, werden folgend auf Basis der Untersuchungsergebnisse dargestellt.

6.2.1 Methodik

6.2.1.1 Prüfeinrichtung

Für die Ultraschallechountersuchungen standen das niederfrequente Ultraschallmessgerät A1220 Monolith und das Prüfkopfarray M2502 mit insgesamt 24 Punktkontaktprüfköpfen zur Verfügung (Abb. 35 und Abb. 36). Die Prüfköpfe werden direkt angekoppelt und jeweils zu 12 Einzelprüfköpfen als Sende- bzw. Empfangsblock angesteuert. Die je Kopf 2 mm breiten Keramikspitzen wandeln durch ihre piezoelektrischen Eigenschaften elektrische Schwingungen in Ultraschallschwingungen um und regen bei ausreichendem Kontakt das angekoppelte Material zu Schwingungen an. Die technischen Spezifikationen des Einzelprüfkopfes sowie des Arrays sind in den Produktblättern des Herstellers zu finden.



Abb. 35: Niederfrequentes Ultraschallmessgerät Monolith A 1220, Fa. ACSYS



Abb. 36: Prüfkopfarray mit Markierung des Sendeblockes (je nach Polung) und der Anregungsrichtung, Fa. ACSYS

Zur Optimierung der Ergebnisse wurden Vorversuche zur Anregungsfrequenz und Polarisierung der Ultraschallwellen durchgeführt. Dafür wurden einige der Prüfkörper mit unterschiedlichen Einstellungs- und Ankopplungsmodi gemessen, anschließend ausgewertet und miteinander verglichen.

Die Schwingungsrichtung der Transversalwellen in Faserrichtung bei der Prüfung quer zur Faser (Ausbreitungsrichtung der Wellen) stellte sich als optimal heraus und wurde bei allen Messungen eingesetzt. Das bestätigt die Erkenntnisse, die in [Hasenstab, 2006] angegeben werden. Die Prüffrequenz wurde nach Variation von Einstellparametern mit veränderten Frequenzen und variierender Pulszahl ermittelt und festgestellt, dass optimale Messfrequenzen aufgrund der laufwegabhängigen Dämpfung für den jeweiligen Querschnitt ausgewählt

werden müssen. Die Anregungsfrequenz wurde standardmäßig mit 55 kHz festgelegt, bei Bedarf fand eine Reduzierung der Frequenz auf bis zu 25 kHz statt. Dabei musste beachtet werden, dass mit der Änderung der Frequenz eine Veränderung der Wellenlänge einhergeht und sich damit die Auflösung verändert.

Die Pulsfrequenz betrug 1 Hz, die Mittelung erfolgte nach 4 Pulsen. Die arraybedingte Verzögerung der Signaldetektion wurde als gerätespezifische Konstante mit 25 μ s übernommen.

6.2.1.2 Prüfkörper

An den Probekörpern wurden Flächenscans mit einem quadratischen Raster von 2,5 cm durchgeführt und an jedem Messpunkt der Rasterfläche ein Amplitudenwert je μ s im Bereich von 0 - 800 μ s erfasst. Dafür wurde eine Matrixmaske am Messgerät erstellt. Für einen Probekörper mit den Abmessungen von $l / b / h = 70 / 15 / 20$ [cm] ergeben sich damit 648 Einzelmesspunkte. Das Prüfraster wurde nach Reihen und Spalten nummeriert und im Rahmen der Auswertung darauf Bezug genommen.

43 Neu- und Altholzprobekörper wurden geprüft. Im Bereich ausgewählter Schadensübergangszonen wurden das Prüfraster verdichtet und zusätzliche Messungen durchgeführt. Die geprüften Probekörper sind im Anhang in Kapitel A 3 aufgeführt.

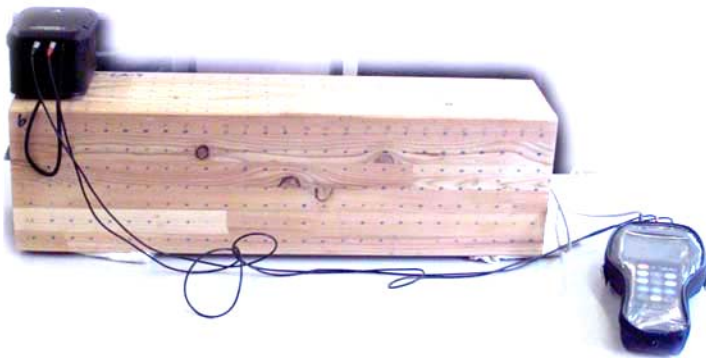


Abb. 37: Prüfkörper während der Messungen am F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde der Bauhaus-Universität Weimar

6.2.1.3 Auswertung

Zunächst wurde versucht, mit der geräteeigenen Software zu arbeiten. Zur Ermittlung der Schallgeschwindigkeiten wurden neben den B-Bildern der Messungen auch die C-Bilder herangezogen. Für die Auswertung der Amplituden erwies es sich als ungünstig, dass die Darstellung des C-Bildes in Stufen von 1 μ s und nur auf grafischem Weg am Monitor gewählt werden konnte. Im C-Bild ist für den Bereich von 1 μ s kein klares Rückwandecho über die Fläche erkennbar (Abb. 39). Durch die starken Schwankungen der Amplituden lässt sich eine Auswertung nur mit häufigem Vergleich mehrerer beieinander liegender μ s-Bereiche durchführen.

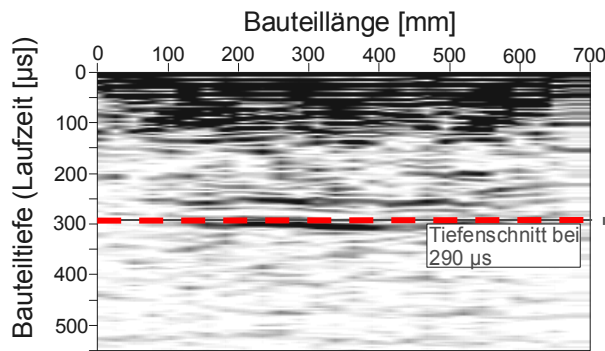


Abb. 38: B-Bild eines Prüfkörpers mit Markierung der Schnittebene bei 290 µs (Bereich von einer µs), 55 kHz

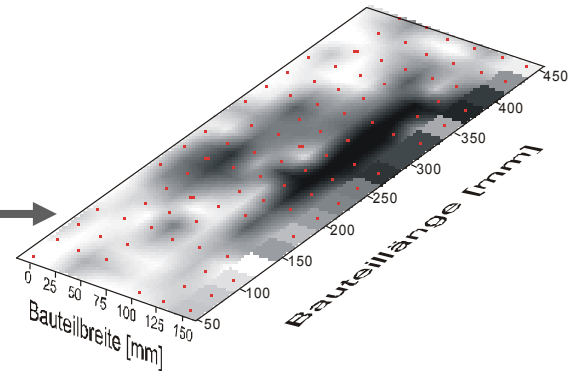


Abb. 39: C-Bild des Prüfkörpers bei 290 µs mit nur teilweiser Detektion der Rückwand (schwarze Flächen), 55 kHz

Zur Auswertung wurde daher ein Auswertungsalgorithmus entwickelt, mit dem Ziel, mehrere µs-Bereiche zu bündeln, so dass nach beliebiger Zusammenfassung und Gruppierung eine Darstellung des gesamten gewählten Laufzeitbereiches ermöglicht wird und sich damit auch die Zeit für die Auswertung selbst reduziert [Baron et al., 2008].

Die Rohdaten wurden nach Konvertierung eingelesen und aus den Datenpaketen bis 800 µs Gruppierungen der Laufzeit ausgewählt. Die Gruppierung selbst erfolgte durch Summierung der Einzelamplituden in dB. Anatomisch bedingte kleinere Laufzeitabweichungen werden damit egalisiert und eng beieinander liegende Amplituden einheitlich erfasst.

Wie in Abb. 40 verdeutlicht, erfolgt die farblich codierte Echoamplitude nun für einen beliebig wählbaren Laufzeitbereich. Eine Reflexionsebene, also beispielsweise die Rückwand eines geprüften Bauteils, wird nun deutlicher und mit wesentlich geringerem Zeitaufwand erkannt. Wenn die Schallgeschwindigkeit für das Bauteil bekannt ist, geht die verbesserte Markierung allerdings zu Lasten der Ermittlung der exakten Bauteildimension. Die Lage der Reflexionsebene errechnet sich gemäß Gl. A-39 im Anhang, so dass beispielsweise bei einer angenommenen Schallgeschwindigkeit von 1000 m/s und einer Laufzeitgruppierung von 30 µs die Reflexionsebene auf 1,5 cm genau angegeben werden kann. Zur Auswertung wurde das Verfahren der Laufzeitengruppierung mit Laufzeitbereichen von 10, 20 oder 30 µs genutzt. Die Darstellung erfolgt wie gewohnt als A-, B-, C- oder D-Bild, so dass zur Ablesung der Echosignale vorzugsweise das B- und C-Bild verwendet werden konnte, wobei das gruppierte und ggf. gereichte B-Bild oft besser geeignet war, um Mehrfachreflexionen zu analysieren. Die Reihung der Signalbilder kann mit der im CAD üblichen Folientechnologie verglichen werden, bei der die einzelnen B- oder D-Bilder wie transparente Einzelbilder übereinander gelegt werden. Für verschiedene Zielstellungen bei der Signalanalyse erhält man so für beliebige Laufzeiten die maximalen Amplitudenausdehnungen über den untersuchten Bauteilabschnitt. Bei der Auswertung ist es möglich, individuelle Farbmodi der Skalierung zu wählen, wobei nicht die Einzelpeaks Marker für die zu analysierenden Reflexionsflächen sind, sondern das Gesamtniveau der Laufzeitgruppe. Die Kombination von sich überschneidenden und lückenlos aneinander gereihten variierenden Laufzeitgruppen führt zur Verfeinerung der Aussage und damit zur Steigerung der Genauigkeit der Vorhersage für das Bauteil. Diese Methode fand bei der Bewertung der Balken effektive Anwendung.

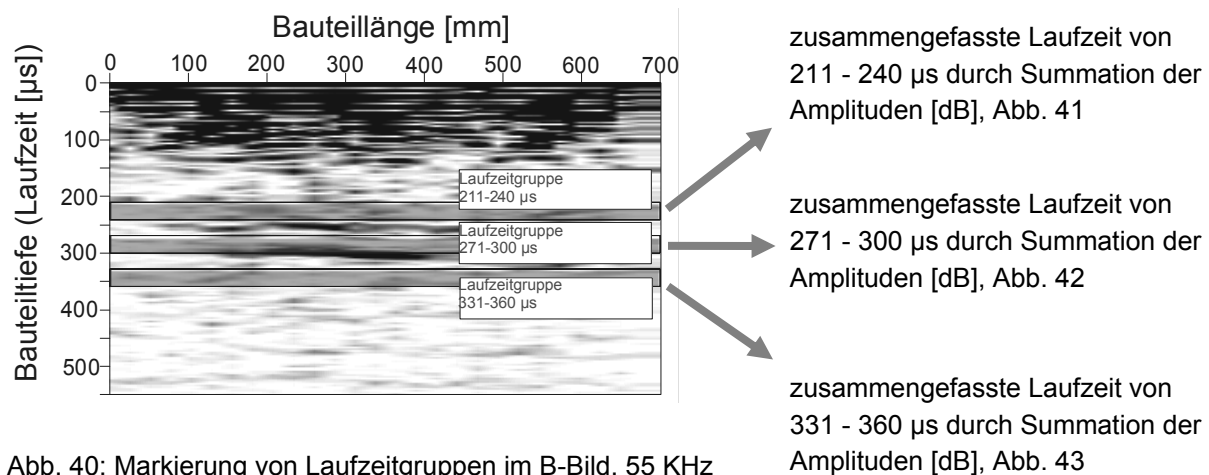


Abb. 40: Markierung von Laufzeitgruppen im B-Bild, 55 KHz
vgl. dazu mit Abb. 38

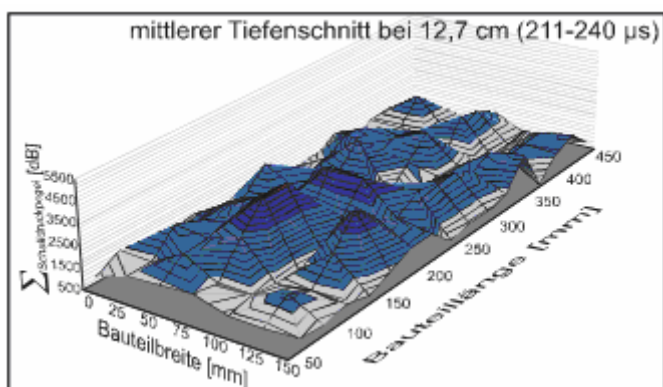


Abb. 41: Laufzeitgruppe 211 - 240 μ s mit vergleichsweise geringem Amplitudenniveau, 55 kHz

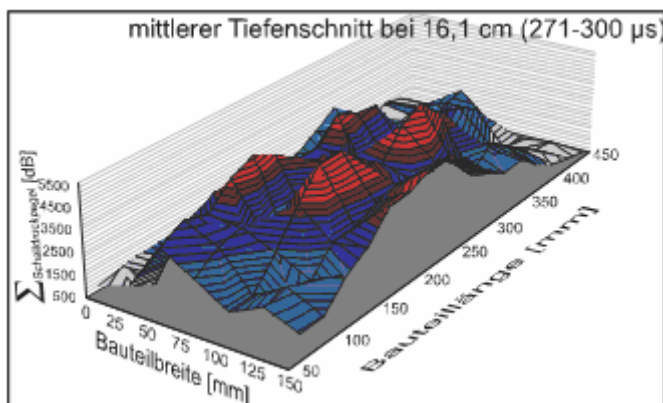


Abb. 42: Laufzeitgruppe 271 - 300 μ s mit hohem Amplitudenniveau und deutlichen Peaks als Marker des Rückwandechos, die Rückwand ist im Mittel 16,1 cm von der Prüfebene entfernt, 55 kHz

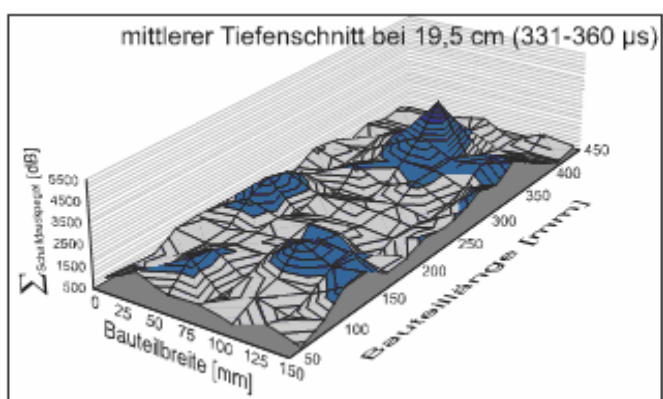


Abb. 43: Laufzeitgruppe 331 - 360 μ s mit geringem Amplitudenniveau, 55 kHz

Die verwendeten Formelzeichen im Zusammenhang mit den Ultraschallmessungen sind so zu verstehen, dass die der Wellenart folgenden Fußnoten erstens für die Definition der holzanatomischen Richtungen in Bezug auf die Schallausbreitungsrichtung („ \perp “ für rechtwinklig zur Faser) und zweitens in Bezug auf die Anregungsrichtung der Prüfköpfe, also der Schwingungsrichtung („ \parallel “ in Faserrichtung) stehen. Mit der Bezeichnung $v_{T\perp\parallel}$ wird die Schallgeschwindigkeit der Transversalwelle, die sich quer zur Faser ausbreitet und in Faserrichtung schwingt, dargestellt.

Mit Zunahme des Schallweges reduziert sich die Amplitude des Schalldruckes (vgl. 5.1.1), so dass die Auswertung von Echosignalen zur Erfassung der Laufzeit oder der Geometrie in der Regel eine individuelle Anpassung und Skalierung der Softwarealgorithmen erfordert. Für mehrere Messungen und Prüfbalken wurden die Funktionen der Schalldruckverteilung in Bezug zur Laufzeit ermittelt. Es konnte danach von einer logarithmischen Verteilung der Form $y = -m \ln(x) + n$ ausgegangen werden (Abb. 44). Diese Ausgleichsfunktion ändert sich je nach Frequenz, Ankopplungsbedingungen, Holzart oder Feuchtegehalt. Das Ausgleichsniveau ist von den jeweiligen Bauteil- und Prüfbedingungen abhängig. Sollte eine deutlichere Darstellung des gedämpften Rückwandechos im Vergleich zu den höheren Amplituden bei geringeren Laufzeiten erfolgen, musste eine logarithmische Skalierung vorgenommen werden. Die praktische Bedeutung der Ermittlung der Verteilungskurve liegt in der tiefenabhängigen Skalierung der Messungen.

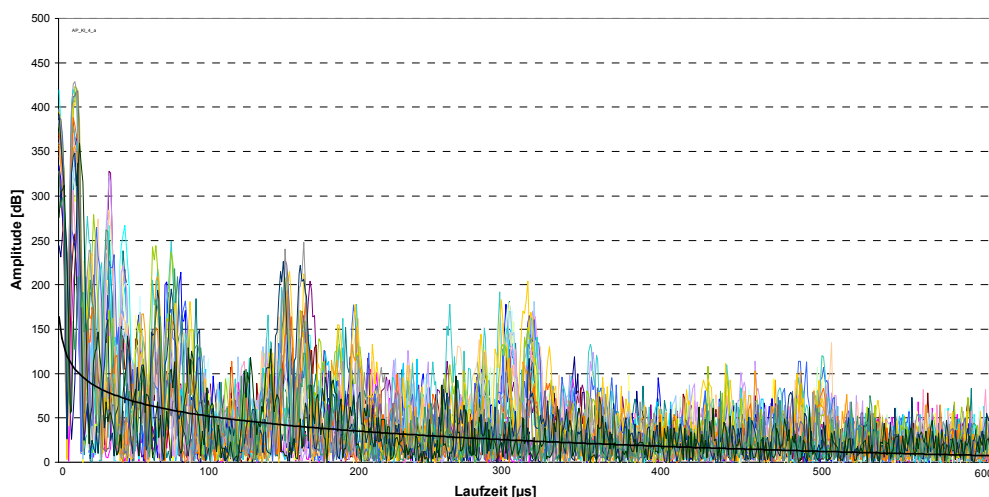


Abb. 44: Amplitudenauswertung eines summierten A-Bildes mit einer gemittelten Kurve von $y = -24,459 \ln(x) + 163,85$ eines Kiefernprüfkörpers, 55 kHz

Die Schallgeschwindigkeit stellt eine Materialkonstante für das individuelle Bauteil bei der konkreten Prüffrequenz dar. Eine Veränderung der Geschwindigkeit kann dann eintreten, wenn die Weitergabe der Schallwelle strukturbedingt verändert wird und bestimmte Frequenzamplituden besser oder schlechter detektiert werden können. Niedrigere Frequenzen haben zur Folge, dass Amplituden besser erkannt werden, so dass bei größeren Balkenabmessungen und bei den geschädigten Hölzern eine entsprechende Frequenzänderung vorgenommen wurde.

Zur Ermittlung der an den Rasterpunkten vorhandenen Bauteildicken konnten die mit der Bohrwiderstandsmessung ermittelten Geometriedaten übernommen werden. Der Schallweg ist vom mittleren Abstand (6 cm) des Sende- und Empfangsblockes zueinander abhängig [Hasenstab, 2006].

6.2.2 Messergebnisse und Auswertung

6.2.2.1 Kennwerte

Nach Durchführung der Ultraschallechomessungen an den Balken wurden der Feuchtegehalt und die Rohdichte ermittelt. Bei Auswahl der Probekörper zur Klimalagerung lag der Schwerpunkt oberhalb von $\omega = 12 \%$, da einerseits die die Messung beeinflussenden Risse etwas reduziert und andererseits ein breites Spektrum an Feuchtigkeitsklassen erreicht werden sollten. Nach Darrtrocknung von entnommenen Prüfstücken und Ermittlung des Feuchtegehaltes wurden die Stichproben in drei Feuchtigkeitsklassen von

$0 \% < \omega_1 \leq 10 \%$,

$10 \% < \omega_2 \leq 20 \%$ und

$20 \% < \omega_3 \leq 30 \%$ eingeteilt. Abb. 45 zeigt die zu den Feuchtigkeitsklassen gehörende

Anzahl der ausgewerteten Stichprobe. Die Prüffeuchtigkeiten lagen zwischen $\omega = 7 \%$ und

$\omega = 28 \%$. Die Anteile der Stichprobe der Klassen $\omega_1 / \omega_2 / \omega_3$ verteilten sich mit

23 % / 34 % / 43 %.

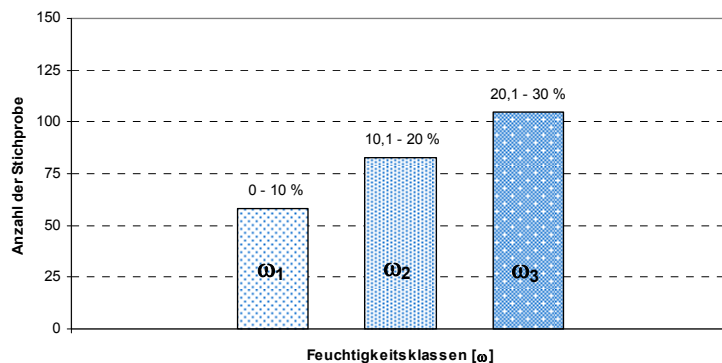


Abb. 45: Anzahl der Datensätze der Stichprobe der Feuchtigkeitsklassen

Die Rohdichtekennwerte werden maßgeblich von den individuellen Standortbedingungen der Holzart bestimmt. Abb. 46 lässt erkennen, dass die mittlere Rohdichte der ungeschädigten Altholzbalken sowohl für Fichte als auch für Kiefer über der des Neuholzes liegt. Aufgrund des Alters der Balken und unter Berücksichtigung der Gebäudekategorie könnten bewusst höherwertige Hölzer mit höherer Rohdichte verbaut worden sein. Die Neuholzer lagen mit Mittelwerten von $0,43 \text{ g/cm}^3$ für Fichte und $0,46 \text{ g/cm}^3$ für Kiefer im Bereich der in DIN EN 338 angegebenen Werte ρ_{mean} , die die Einstufung in Festigkeitsklassen regelt. Die Tab. A-1 im Anhang gibt einen Überblick zu den ermittelten Rohdichten und ausgewählten statistischen Kenngrößen. Es kann festgestellt werden, dass die Streuung der Rohdichte der geschädigten Althölzer mit Variationskoeffizienten für Fichte/Tanne (FI/TA) und Kiefer (KI) mit 10 % bzw. 16 % über der des ungeschädigten Holzes liegt. Das Lärchenholz (LA) besitzt innerhalb der Prüfkategorie der Neuholzer einen Variationskoeffizienten von lediglich 5 %. Die übrigen Variationskoeffizienten liegen noch darunter.

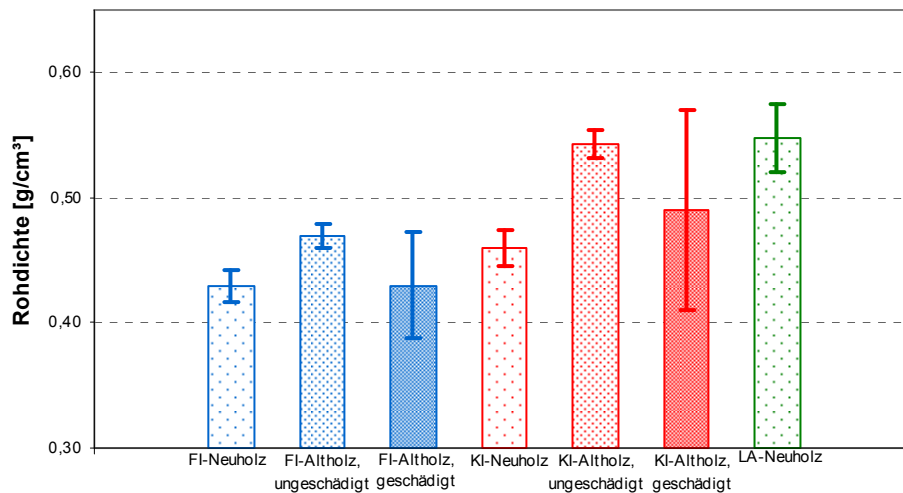


Abb. 46: Rohdichteverteilung bei $\omega = 12$ % der Prüfkategorien der Balken

6.2.2.2 Schallgeschwindigkeit und Rohdichte

Die Schallgeschwindigkeiten variierten in ihren Mittelwerten im Vergleich der Neu- und Althölzer untereinander (Abb. 47). Die Einflüsse auf die Schallgeschwindigkeit werden in den weiteren Abschnitten vertiefend dargestellt, so dass die folgenden Aussagen unabhängig von weiteren Einflussgrößen getroffen werden. Prinzipiell wurde bei den Althölzern eine bessere Schallleitung im Vergleich zu den Neuholzlern festgestellt. Unter Berücksichtigung der Prüffrequenz wurde eine Verringerung der Schallgeschwindigkeiten der geschädigten Hölzer auf etwa 90 % der ungeschädigten festgestellt (Verteilungskennwerte in Tab. A-2 im Anhang).

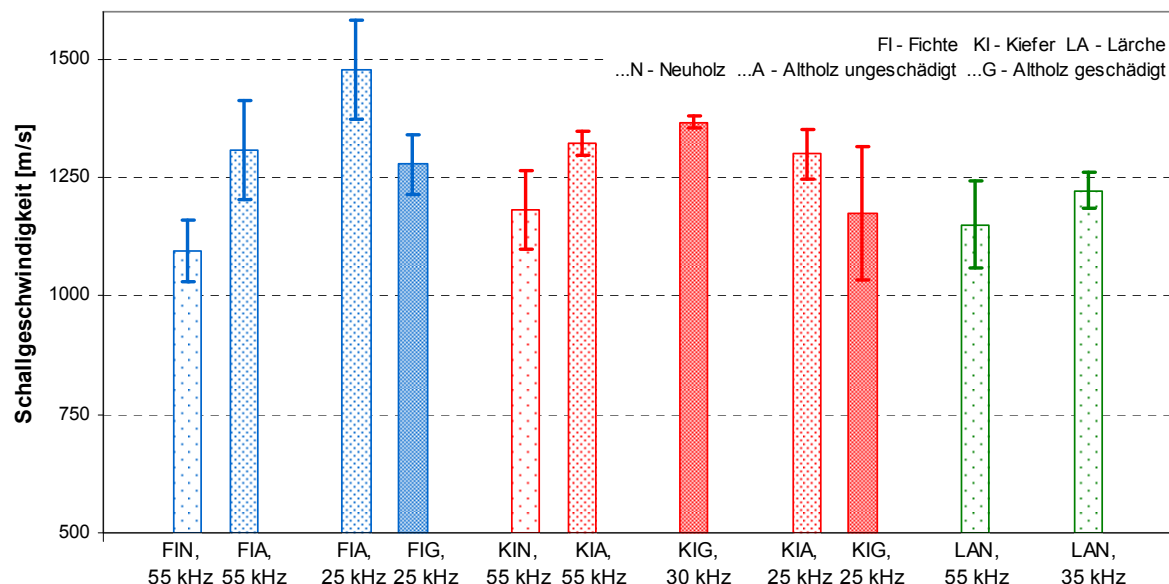


Abb. 47: Schallgeschwindigkeiten der Prüfkategorien

Die Amplitudenerfassung zur Markierung des Rückwandechos wurde bei zunehmender Rohdichte schwieriger, so dass in diesen Fällen niedrigere Frequenzen genutzt wurden. Nach Auswertung für den gewählten Frequenzstandard von 55 kHz konnte für die Prüfkategorien die Zunahme der Schallgeschwindigkeit mit steigender Rohdichte ermittelt werden (Abb. 48). Allerdings ließ sich ein Zusammenhang für die bei 55 kHz geprüfte Kategorie der Kiefern- und Fichten-Neuhölzer nicht herstellen, da die Rohdichtespanne zu gering war.

Tab. 7 gibt die Ergebnisse der Regressionsanalysen wieder. Die geprüften Fichten-, Kiefern- und Lärchenhölzer wurden dabei zusammengefasst und bestätigen einen Zusammenhang, der sich mit einer Ausgleichsgerade gut beschreiben lässt. Die Steigung der Geraden fällt für die Kiefer etwas geringer aus als für die Fichten- und Lärchenhölzer. Ein logarithmischer Ansatz, wie in Tab. 7 angegeben, verbessert den Zusammenhang nicht, so dass die lineare Regression favorisiert wurde. Zu Vergleichszwecken wurde zusätzlich eine Regressionsanalyse mit Polynomansatz 2. Grades durchgeführt. Die einzelnen Korrelationskoeffizienten verbesserten sich zum Teil zwar deutlich (z. B. für Fichte auf $r_{xy} = 0,74$), jedoch war beim Vergleich der einzelnen Holzarten untereinander die Differenz der Funktionsgleichungen zu gravierend und wurde verworfen.

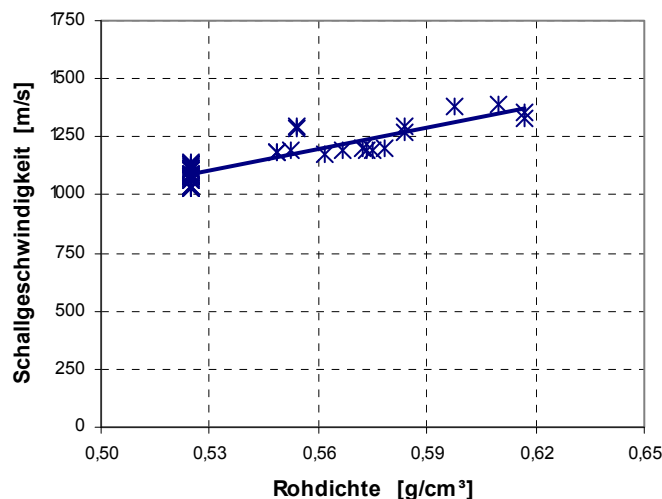


Abb. 48: Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit und Rohdichte der geprüften Lärchenhölzer, $r_{xy} = 0,90$, 55 kHz

Tab. 7: Verteilungskennwerte der Schallgeschwindigkeit der Prüfbalken in Abhängigkeit von der Rohdichte bei $\varphi = 12\%$

Zielgröße $v_{T\perp II}$ [m/s] bei 55 kHz	Regressionsansatz mit beeinflussender Variable	n [-]	r_{xy} [-]
Fichte- gesamt	$v_{T\perp II} = 3111 \rho_{12} - 132,0$	58	0,64
	$v_{T\perp II} = 1341 \ln(\rho_{12}) + 2239$	58	0,62
Kiefer- gesamt	$v_{T\perp II} = 1719 \rho_{12} + 393,0$	67	0,59
	$v_{T\perp II} = 836 \ln(\rho_{12}) + 1834$	67	0,59
Lärche- gesamt	$v_{T\perp II} = 3076 \rho_{12} - 523,6$	45	0,90
	$v_{T\perp II} = 1726 \ln(\rho_{12}) + 2203$	45	0,91

Die Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Rohdichte des Holzes wurde für die Longitudinalwellen in der Literatur nicht eindeutig beantwortet. Die gefundene Korrelation der Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit der Transversalwellen von der Rohdichte muss hier unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Rohdichtespanne gesehen werden.

6.2.2.3 Schallgeschwindigkeit und Querschnitt

Das aufgebrachte Prüfraster ermöglichte für die Datensätze eine gut nachvollziehbare Messposition in Bezug auf den durchschallten Querschnittsbereich. Für die Auswertung des Einflusses der auf dem Schallweg liegenden Anteile an Früh- und Spätholz, aber auch von Kern- und Splintholz wurden Querschnittszonen definiert (Abb. 49). Der Splintanteil, wenn überhaupt vorhanden, befand sich je nach Prüfkörperdimension in den Querschnittszonen 3 und größer. Die Splintanteile der verfügbaren Prüfkörper waren nur gering, so dass bei Durchschallung des Querschnittes in allen Fällen Kernanteile auf dem Schallweg vorhanden waren.

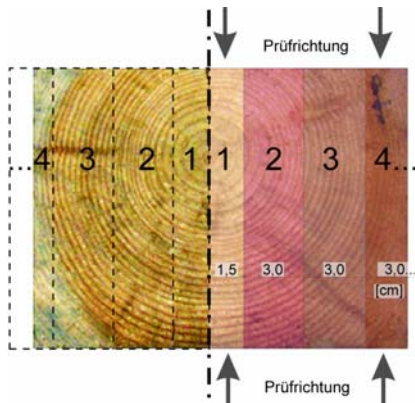


Abb. 49: Querschnittszonen der Richtungsanteile der Jahresringe am Beispiel eines Kiefern balkens

Die Datensätze der Ultraschallechomessungen wurden entsprechend codiert und ausgewertet. Unter Berücksichtigung der Einflüsse von Rohdichte und Feuchtegehalt wurden nur die Balken ausgewertet, von denen Messungen unterschiedlicher Querschnittszonen gemäß Abb. 49 vorlagen. Für 29 geprüfte Balken wurde die Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Querschnittszone bestimmt und die Steigungen der Ausgleichsgeraden untersucht. Im Ergebnis der Auswertungen konnte keine gesetzmäßige und reproduzierbare differierende Verteilung der Schallgeschwindigkeit über den Querschnitt festgestellt werden. Auch nach Zusammenfassung der Prüfkategorien und Mittelung der Werte wurde keine markante Veränderung des Zusammenhangs ermittelt. Abb. 50 zeigt die Messungen der Prüfkategorien mit 55 kHz für die Neu- und ungeschädigten Althölzer und die der geschädigten Althölzer mit 25 kHz.

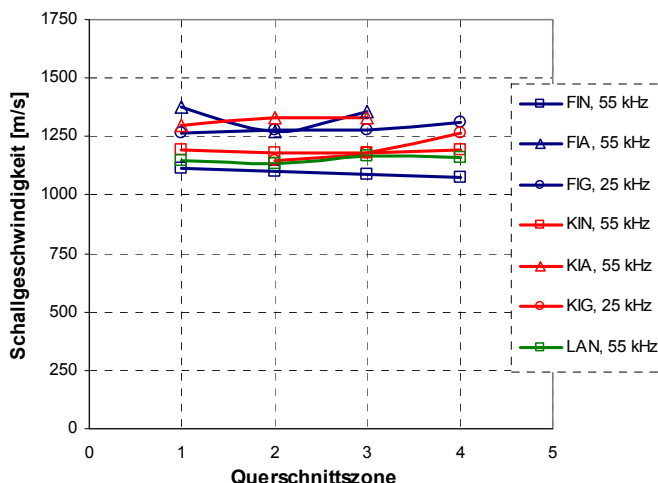


Abb. 50: Verteilung der mittleren Schallgeschwindigkeit über den Querschnitt

Die Ursache der Verringerung der Schallgeschwindigkeit des Fichten-Altholzes konnte nach Überprüfung auf anatomische Besonderheiten nicht ermittelt werden. Wie bei allen Messungen ist der geräte- und verfahrenstechnisch bedingte Messfehler zu berücksichtigen. Dieser beträgt für Transversalwellen rund 7 % [Hasenstab, 2006]. Das entspricht bei einer Schallgeschwindigkeit von 1350 m/s einer Abweichung von ± 95 m/s.

6.2.2.4 Schallgeschwindigkeit und Feuchtigkeit

Die Schallgeschwindigkeit der Transversalwellen wurde nach der unabhängigen Variable Feuchtigkeit ausgewertet. Es wurde ein sehr enger Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit und Feuchtegehalt festgestellt.

Mit zunehmendem Feuchtegehalt ist eine Abnahme der Schallgeschwindigkeit, für die Lärche stärker als für die Kiefer und Fichte (Abb. 51, Abb. 52), zu verzeichnen. Die in Tab. 8 aufgeführten Kennwerte belegen die enge Korrelation mit bis zu $r_{xy} = 0,94$. Trotz unterschiedlicher Steigungsfaktoren der einzelnen Holzarten, wurde ein Vergleich aller geprüften Nadelhölzer, einschließlich der Althölzer, bei der Frequenz von 55 kHz durchgeführt und eine immer noch deutliche lineare Abhängigkeit gefunden.

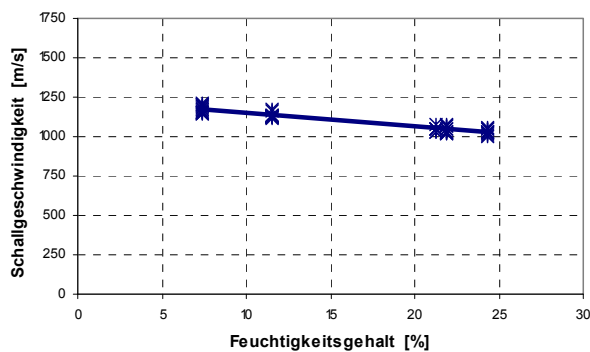


Abb. 51: Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit und Feuchtegehalt für Fichten-Neuholz, 55 kHz

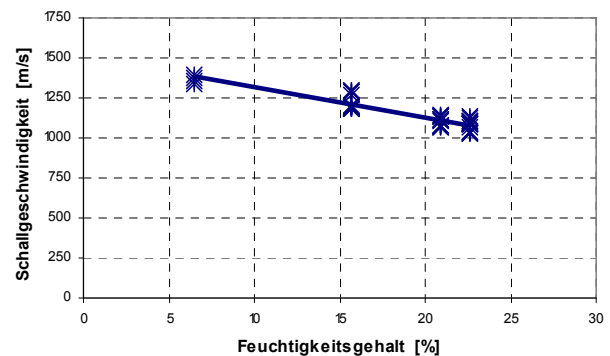


Abb. 52: Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit und Feuchtegehalt für Lärchen-Neuholz, 55 kHz

Tab. 8: Verteilungskennwerte der Schallgeschwindigkeit der Prüfbalken in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt

Zielgröße $v_{T\perp II}$ [m/s] bei 55 kHz	Regressionsansatz mit beeinflussender Variable	n [-]	r_{xy} [-]
Fichten-Neuholz	$v_{T\perp II} = -8,73 \omega + 1237$	49	0,95
Kiefern-Neuholz	$v_{T\perp II} = -9,63 \omega + 1332$	57	0,79
Lärchen-Neuholz	$v_{T\perp II} = -18,81 \omega + 1503$	45	0,93
Nadelhölzer- gesamt	$v_{T\perp II} = -10,11 \omega + 1330$	170	0,64

Die Zusammenfassung der Daten für die Nadelhölzer insgesamt wurde durchgeführt, um auszuschließen, dass der Zusammenhang von Schallgeschwindigkeit und Rohdichte unabhängig der Holzart ist. Danach besteht ein jeweils engerer Zusammenhang bei Berücksichtigung der Holzart.

6.2.2.5 Äste

Um eindeutige Aussagen treffen zu können, wurden Untersuchungen bei einheitlicher Frequenz von 55 kHz betrachtet, um den Einfluss der Wellenlänge bei veränderter Frequenz zu eliminieren. Im Folgenden werden einige B- und C-Bilder wiedergegeben, so dass zum besseren Verständnis mit der unter 5.1.4 dargestellten Abb. 23 verglichen werden kann.

Oberflächennahe Äste, die in **Schallausbreitungsrichtung** verlaufen, verursachen je nach Größe keine oder eine nahezu vollständige Auslöschung von Echosignalen. Durch Verwachsungen des Astes und der damit verbundenen Änderung der Faserrichtung können beim Sägen zusätzliche Unebenheiten in der Holzoberfläche auftreten, die eine schlechte Ankopplung des Prüfgerätes und einen entsprechend reduzierten Signalempfang verursachen. Oft einhergehend mit den Schwindprozessen im Zuge der Verarbeitung entstehen durch die Anisotropie oft kleine Risse im Astbereich, die eine zusätzliche Dämpfung der Oberflächenwellen hervorrufen. Das Echosignal kann in diesem Zusammenhang bei verwachsenen Ästen eher erwartet werden. Bis zu einem Durchmesser von etwa 10 mm wurde ein Asteinfluss nicht festgestellt. Davon ausgehend, dass der Astdurchmesser in Richtung der Ausbreitungsrichtung der Wellen abnimmt (Prüfrichtung zur Markröhre), waren Echosignale der Rückwand im Bereich von 12 mm bis 16 mm Astdurchmesser erkennbar. Oberhalb von 16 mm Durchmesser führten sowohl Weiß- als auch Schwarzäste zur kompletten Signalauslöschung. Das Rückwandecho bleibt bei großen Astdimensionen oder einer massiven Astansammlung, insbesondere im Bereich von Astquirlen, ganz aus (Abb. 54). Das B-Bild der Abb. 54 ergibt sich aus der Messung entlang der gestrichelten Linie (Prüfreihe) in Abb. 53. Dabei werden auch die Oberflächenwellen durch parallel zur Ausbreitungsrichtung liegende Äste sehr stark gedämpft und sind meist nicht mehr erkennbar. Unterschiede zwischen Neu- und Altholz wurden nicht festgestellt.

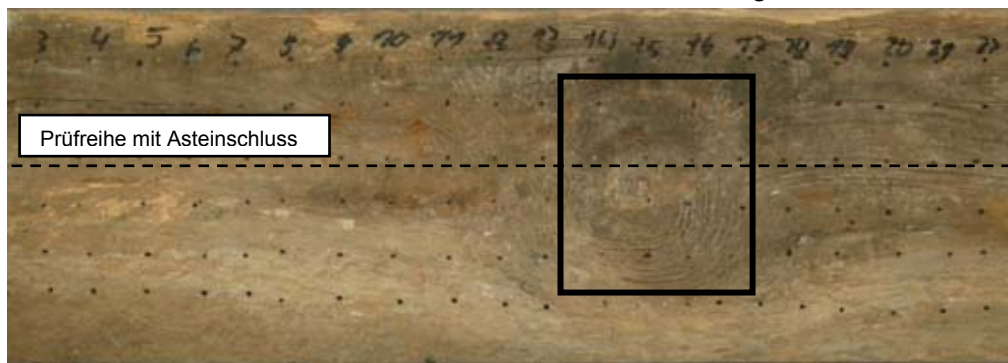


Abb. 53: Altholz Kiefernprüfkörper mit Weißast (\varnothing 50 mm) bzw. Astquirl

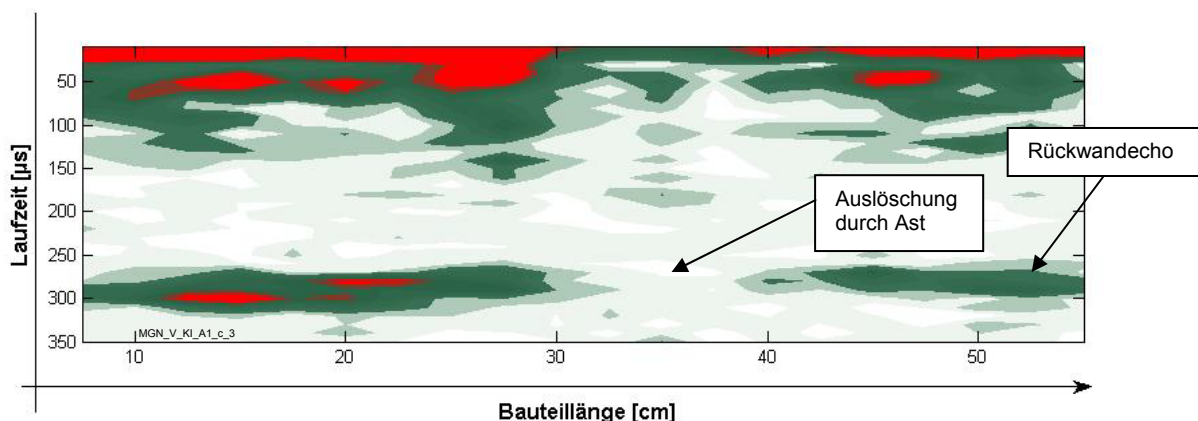


Abb. 54: B-Bild des Prüfkörpers mit Astquirl bei etwa 30 - 40 cm Balkenlänge, schwache Signale der Oberflächenwellen und ausbleibendes Rückwandecho des Balkens (55 kHz, Raster 2,5 cm)

In der Tab. 9 sind einige Ergebnisse der vielen überprüften Astbereiche exemplarisch wiedergegeben.

Tab. 9: Äste in Schallausbreitungsrichtung, Detektion bei 55 kHz und 2,5 cm Raster

Holzart	Prüfkörper (exemplarisch)	kleinster Astdurch- messer [mm]	Signal der	
			Oberflächenwelle	Reflexion
Fichte	AP-FI-1-a	5 (Schwarzast)	ja	ja
Fichte	AP-FI-2-a	8 (Weißast)	ja	ja
Kiefer	AP-KI-2-d	8 (Schwarzast)	ja	ja
Lärche	AP-LA-1-a	10 (Schwarzast)	ja	ja
Fichte	AP-FI-2-b	12 (Weißast)	nein	ja
Lärche	AP-LA-2-b	12 (Schwarzast)	nein	ja, gedämpft (Abb. 56)
Fichte	AP-FI-1-a	16 (Weißast)	nein	ja, gedämpft
Fichte	AP-FI-2-d	16 (Schwarzast)	nein	nein
Kiefer	AP-KI-2-b	20 (Schwarzast)	nein	nein
Fichte	AP-FI-1-a	29 (Weißast)	nein	nein
Fichte	AP-FI-2-b	37 (Weißast)	nein	nein
Kiefer	MGN-V-KI-A1-d	50 (Weiß-/Schwarzast)	nein	nein

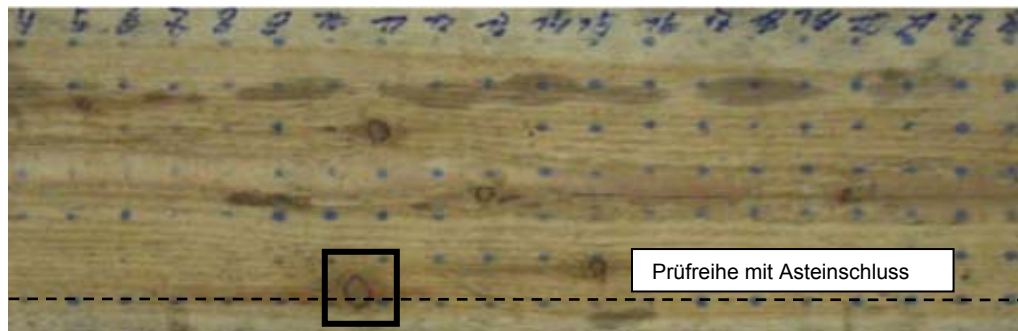


Abb. 55: Neuholz-Lärchenprüfkörper mit Schwarzast (\varnothing 12 mm)

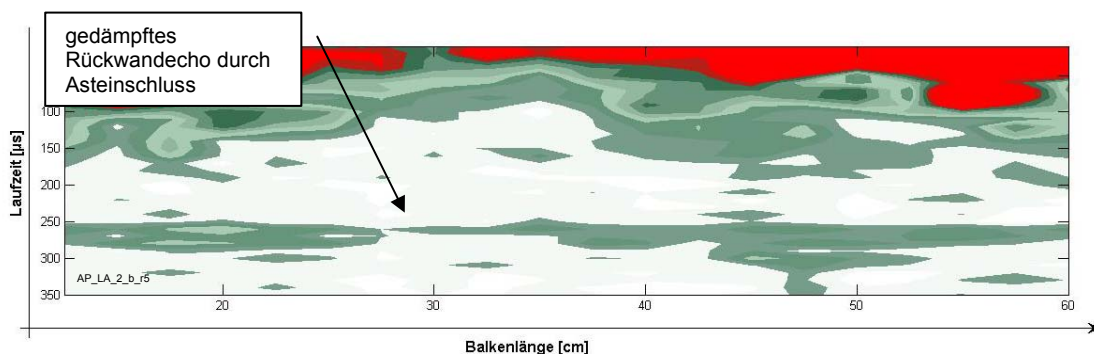


Abb. 56: B-Bild des Lärchenprüfkörpers mit Astbereich bei 30 cm Balkenlänge, schwache Signale der Oberflächenwellen und gedämpftes Rückwandecko des Balkens (55 kHz, Raster 2,5 cm)

In Abb. 56 ist das B-Bild einer Prüfreihe (gestrichelte Linie in Abb. 55) dargestellt, bei dem das Rückwandecko durch den Ast in Schallausbreitungsrichtung gedämpft erkannt werden kann.

Äste, die **quer zur Schallausbreitungsrichtung** verlaufen, verursachen Reflexionen an deren Grenzflächen und je nach Astgröße kann ein Signal empfangen werden, wenn der Anteil an Reflektorebene ausreichend ist. Genau genommen gibt es bei Zylinderquerschnitten keine Reflektorebenen, jedoch sind Reflexionen durch Streuung und Beugung bei ausreichend geringem Tangentenwinkel (großer Astdurchmesser) erkennbar. Das Echo

dahinter liegender Reflexionsebenen kann in Abhängigkeit vom Durchmesser aufgrund der Arrayspezifik teilweise oder geschwächt erkannt werden. Äste in Oberflächennähe (Kantenäste) führen zur Dämpfung der Oberflächenwellen, vergleichbar mit den Effekten von Ästen in Schallausbreitungsrichtung. Für die Reflexion und die Weiterleitung der Schallwellen ist das Verhältnis von Reflexion und Durchlässigkeit (abhängig vom Impedanzsprung) an der Grenzfläche entscheidend (siehe 5.1.1, Beispiel Ast).

Die Erkennung von Ästen, die rechtwinklig zur Durchschallungsrichtung verlaufen, ist nach den hier gewonnenen Erkenntnissen ab rund 20 mm möglich. Die Asterkennung ist bei Neuholz und bei ungeschädigtem Altholz gleichermaßen möglich.

Eine Schädigung von Hölzern bedeutet das zusätzliche Auftreten von Inhomogenitäten, die eine Änderung der akustischen Eigenschaften nach sich ziehen. Je nach Schädigungsgrad kommt es zu einem hohen Signal-Rausch-Verhältnis, das klare Aussagen zu Ästen im Bauteil erschwert oder ganz unmöglich macht. Durch die bei Pilzbefall reduzierte Rohdichte in Kombination mit der Zerstörung der schallleitenden Tracheiden bzw. deren Wandperforierung kommt es zu einer deutlichen Signaldämpfung. Sind die Äste selbst zerstört, so wirken diese ebenso dämpfend auf die Amplituden.

Beispielhaft ist in der folgenden Abbildung die Signalauswertung eines rechtwinklig zur Schallausbreitungsrichtung verlaufenden Astes mit 20 mm Durchmesser dargestellt. Der Ast befindet sich bei etwa 25 cm Bauteillänge, rund 4 cm unterhalb der Prüfebene und beginnt auf der Seite, die der Reihe 6 (untere Grafik der Abb. 58) am nächsten liegt. Das Echosignal deutet auf eine Reflexion an der Astoberfläche hin. In Richtung Markröhre nimmt die Signalintensität ab und ist bei Reihe 4 (obere Grafik) nicht mehr erkennbar. Das bedeutet, dass der an dieser Stelle mit dem umgebenden Holzkörper verwachsene und gemäß dem Wuchs dünnere Ast dadurch nicht mehr detektiert wird.

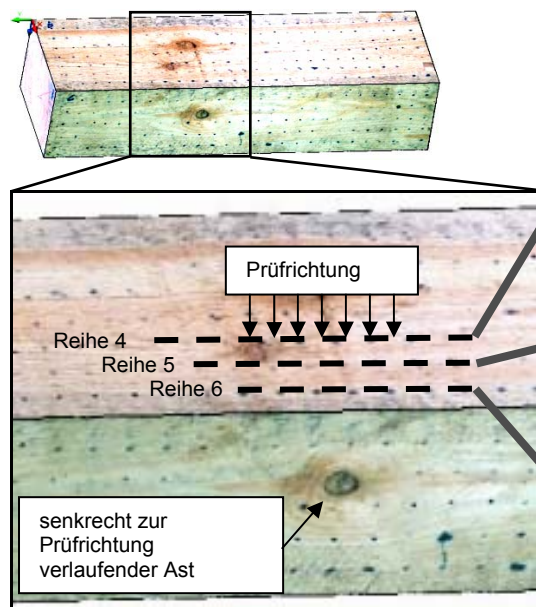


Abb. 57: Kiefernprüfkörper mit senkrecht zur Prüfrichtung liegendem Ast

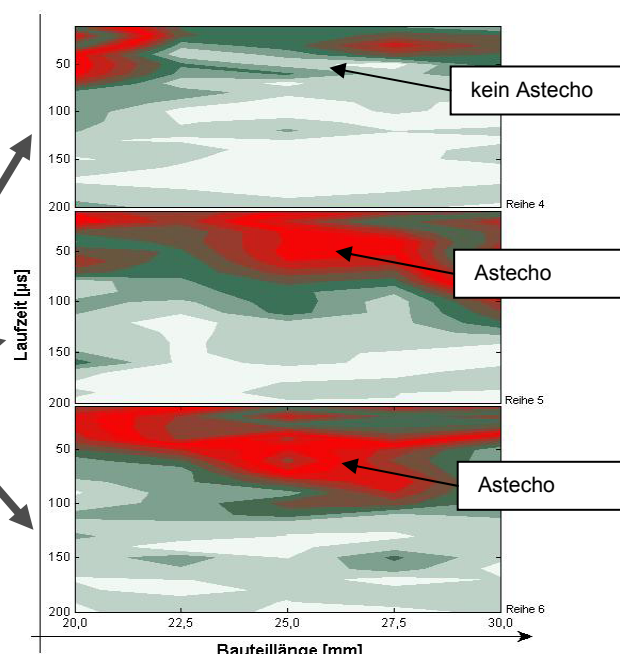


Abb. 58: B-Bilder der Messungen eines Astes senkrecht zur Schallausbreitungsrichtung (55 kHz, Raster 2,5 cm)

Voraussetzung für ein deutliches Signal ist, dass die Äste nicht zu weit weg von der Prüfebene, jedoch auch nicht innerhalb der Laufzeiten der Oberflächenwellen liegen, da durch deren Amplituden in der Regel eine Überlagerung der Echosignale stattfindet. Je größer die Äste sind, desto größer kann der Randabstand für eine Detektion sein.

Hinter dem Ast liegende Reflektoren (z. B. Rückwand) werden umso stärker verschattet, je größer der Ast ist und je näher sich der Ast an dem Reflektor befindet. Der Laufzeitvergleich des Reflektorechos und des Astechos sollte jedoch Klarheit bei der Signalzuordnung bringen. In der Tab. 10 sind einige der vielen überprüften Astbereiche exemplarisch wiedergegeben.

Tab. 10: Äste quer zur Schallausbreitungsrichtung, Detektion bei 55 kHz und 2,5 cm Raster

Holzart	Prüfkörper (exemplarisch)	Astdurchmesser (sichtbar) [mm]	Tiefenlage (sichtbar) [mm]	Signal Oberflächenwelle	Signal Ast-echo	Signal Rückwand-echo
Lärche	AP-LA-2-c	10 (d, Schwarzast)	48	ja	nein	ja
Lärche	AP-LA-3-c	13 (b, Schwarzast)	51	ja	nein	ja
Fichte	AP-FI-1-d	15 (c, Schwarzast)	10	ja, gedämpft	-*	ja
Fichte	AP-FI-2-b	16 (c, Schwarzast)	30	ja, gedämpft	ja*	ja
Lärche	AP-LA-4-a	18 (d, Schwarzast)	41	ja	ja	ja
Kiefer	AP-KI-2-b	20 (c, Schwarzast)	38	ja	ja (Abb. 58)	ja
Kiefer	AP-KI-4-a	22 (d, Schwarzast)	42	ja	ja	ja
Fichte	AP-FI-4-d	25 (a, Weißast)	10	ja, gedämpft	ja*	ja
Kiefer	AP-KI-2-a	25 (b, Schwarzast)	66	ja	nein	ja
Fichte	EF-I-FI-A1-a	28 (d, Weißast)	50	ja	nein	ja
Fichte	AP-FI-2-a	30 (b, Weißast)	5	ja, gedämpft	-*	ja
Kiefer	MGN-V-KI-A1-c	50 (d, Weiß-/ Schwarzast)	61	ja	ja	nein

* innerhalb des Bereiches der Oberflächenwellen

6.2.2.6 Risse

Rissechos sind prinzipiell denen an der Bauteilrückwand gleich und zeigen somit dieselben Erkennungsmerkmale, jedoch bei anderer Laufzeit und anderer Ausdehnung. Die Rissursachen werden in den meisten Fällen im Schwinden des Holzes liegen. Für Rissbildungen durch Ringschäle (entlang des Jahrringes verlaufende Risse), aber auch Versagensbrüche, die zur Herausbildung von Grenzschichten im akustischen Verständnis führen, gelten ähnliche physikalische Grundlagen des Wellenverhaltens. Die Transversalwellen treffen auf das Rissufer und damit auf einen Impedanzsprung des Bauteiles von Holz zu Luft. Aus den Gl. 5-1 bis Gl. 5-4 ergibt sich für das Wellenverhalten an der Grenzfläche Holz-Luft ein Reflexionsfaktor von $R_{H-L} = -1$ und ein Durchlässigkeitsfaktor von $D_{H-L} = 0$. Eine Weiterleitung

des Schallimpulses ist nicht möglich und die Welle wird mit einem Reflexionswinkel, der gleich dem Einfallswinkel ist, zurücklaufen.

Risse in Schallausbreitungsrichtung führen zu einer starken Dämpfung der Oberflächenwellen, so dass eine reduzierte Signalamplitude registriert wird oder bei mittlerer Lage des Risses innerhalb des Arrays deren völliges Auslöschen eintritt. In Abb. 60 ist das C-Bild des gesamten Messrasters der in Abb. 59 dargestellten Probekörperfläche abgebildet.

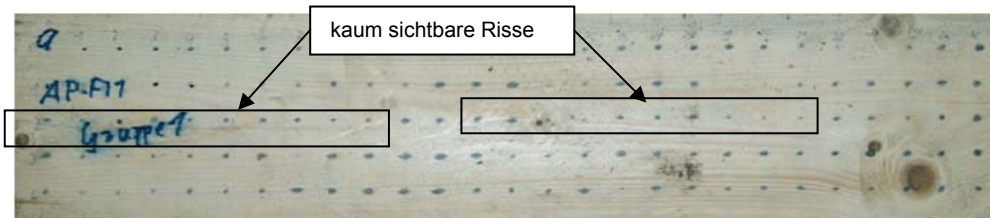


Abb. 59: Probekörper (Fichte, Foto entzerrt) mit parallel zur Schallausbreitungsrichtung verlaufenden Ästen (rechts) und kaum erkennbarer mittlerer Rissbildung

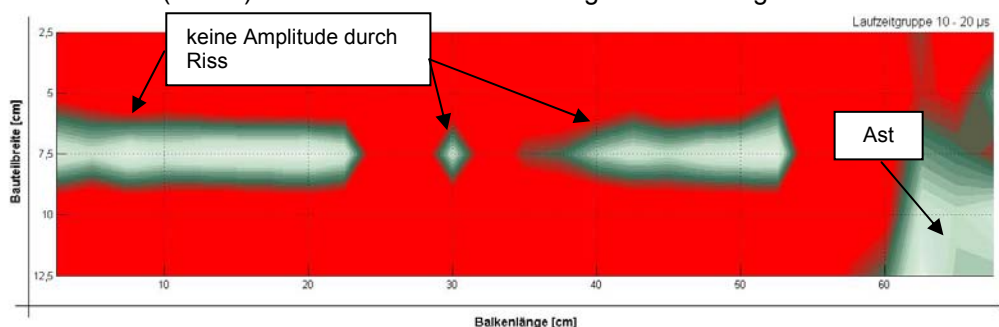


Abb. 60: C-Bild des Probekörpers der Laufzeitgruppe 11 - 20 μ s, ohne bzw. mit schwachem Signal der Oberflächenwelle im Bereich der Äste und deutlicher Markierung der Risse (55 kHz, Raster 2,5 cm)

Sind wenige und kleinere Risse vorhanden, umlaufen die Oberflächenwellen die Risse entlang der Rissufer und führen zu gedämpften Signalen. Kleine gegenüberliegende Risse wurden aufgrund der Überlagerung mit dem Rückwandecho nicht erkannt. Große Risse können je nach Ausdehnung durch Ausbleiben des Rückwandechos lokalisiert werden.

Risse rechtwinklig zur Schallausbreitungsrichtung lassen sich auch bei verdeckten Konstruktionen aufgrund der Totalreflexion am Rissufer prinzipiell gut feststellen, nur muss bei unbekannten Querschnittsabmessungen eine Abgrenzung zum Rückwandecho gefunden werden, was beispielsweise über die Bewertung des Signalverlaufes erfolgen kann. Risse verlaufen in radialer Richtung und sind meist weit vor oder aber mit dem Erreichen der Markröhre wieder geschlossen. Der Rissverlauf ist einerseits hinsichtlich der Längsorientierung in Bauteilachse und andererseits hinsichtlich des Verlaufes über den Querschnitt zu untersuchen, um statische Einflüsse ableiten zu können (vgl. 3.1.3.3.2). Schwindrisse können gut im B-Bild erkannt und bewertet werden, wie im folgenden Beispiel an einem Kiefernprüfkörper zu sehen ist. Der Rissverlauf ließ sich durch den zeitlichen Versatz der Amplitudenspitzen im B-Bild gut nachvollziehen. Die Risstiefen wurden dokumentiert und lagen zwischen 51 mm (Abb. 61, rechte Seite) und 18 mm (Abb. 61, linke Seite). Die Messung erfolgte mit einer Lehre, die dem teilweise sprunghaften Rissverlauf nicht immer folgen konnte, so dass davon auszugehen ist, dass die Risswurzel noch etwas tiefer lag. Das B-Bild der Abb. 62 stellt die Reihe mit 2,5 cm Randabstand dar. Der Rissverlauf der sich anschließenden Reihe mit 5 cm Randabstand ist dann nur noch auf der rechten Seite geschwächt zu erkennen.

Die immer noch mögliche Risserkennung begründet sich bei 5 cm Randabstand mit der vorhandenen Risstiefe und dem geringeren Laufweg der Schallwellen.

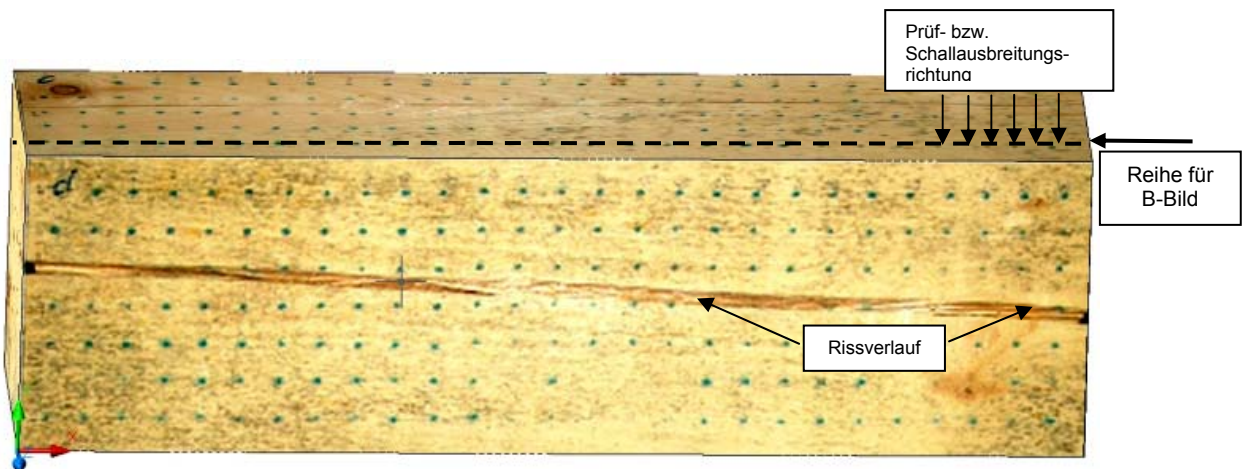


Abb. 61: Visualisierter Kiefernprüfkörper mit senkrecht zur Prüfrichtung liegendem Riss

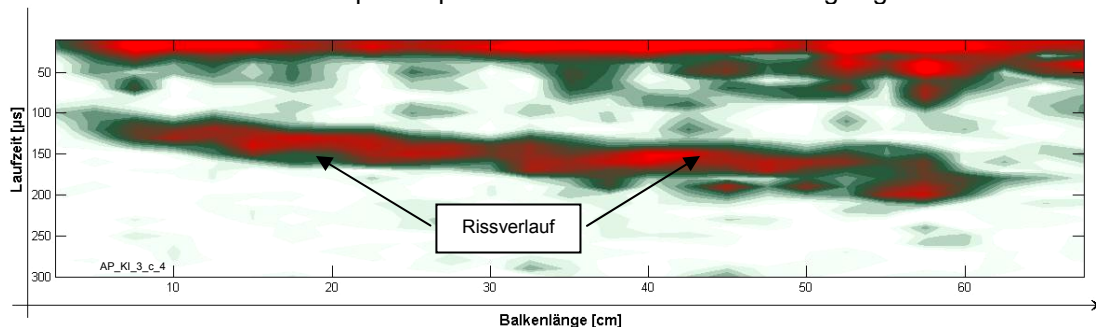


Abb. 62: B-Bild der in Abb. 61 markierten Reihe mit Rissverlauf (55 kHz, Raster 2,5 cm)

Gerade bei historischen Bestandskonstruktionen finden sich Balken mit zentral im Querschnitt liegender Markröhre wieder, die durch das Schwinden zum Reißen in der Mitte der Balkenbreite oder -höhe führen. In Abb. 63 ist ein Prüfkörper beispielhaft dargestellt, bei dem der Riss in der Mitte der Bauteilhöhe liegt. Nun würde theoretisch die Möglichkeit bestehen, dass das Mehrfachecho als Rückwandecho gedeutet wird. Das kann aber ausgeschlossen werden, wenn über eine grobe Halbierung der Detektionszeit ein zugehöriges Echosignal gefunden wird. Im Falle der Abb. 64 ist das sehr deutlich erkennbar. Im umgekehrten Fall grenzt sich ein undeutliches Rückwandecho durch fehlende vorherige Amplitudenausschläge ab. Zusätzlich kann im A-Bild ein Mehrfachecho gut als solches durch Amplitudenvergleich erkannt werden. Ist der Absolutbetrag des Amplitudenwerts des zweiten Echos größer als der Wert des ersten Echosignals, handelt es sich somit nicht um ein Mehrfachecho, sondern beispielsweise um das Rückwandecho.

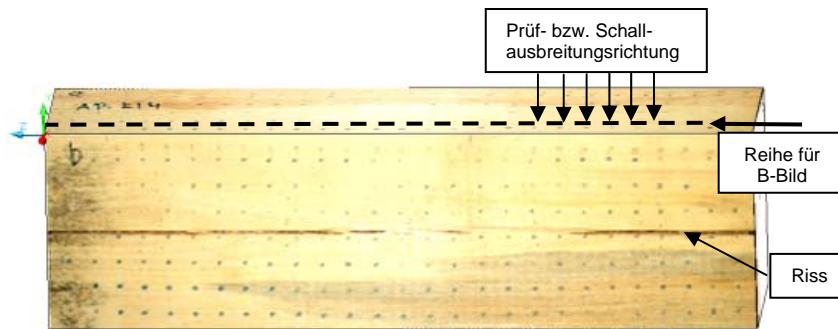


Abb. 63: Visualisierter Kiefernprüfkörper mit senkrecht zur Prüfrichtung liegendem Riss

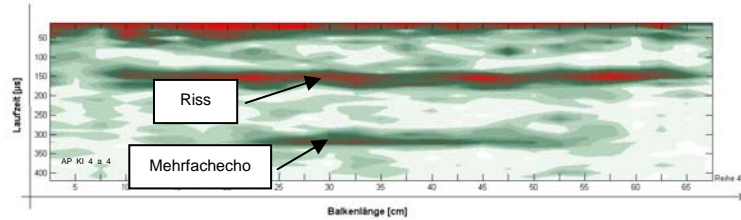


Abb. 64: B-Bild der in Abb. 63 markierten Reihe mit Rissverlauf (55 kHz, Raster 2,5 cm)

Mehrere Rissgeometrien und die Lage der Risse in Bezug auf das Prüfkopfarray wurden untersucht und die Signale ausgewertet. Dafür war es erforderlich, den Bezug von Prüfkopfarray und Rissposition herzustellen, so dass die Risswurzel in Bezug zur Arraymitte gebracht wird. Abb. 65 zeigt schematisch die hier definierten Positionen zueinander. Bei positivem Vorzeichen verlief der Riss über die Hälfte des Arrays. Je größer der Wert war, desto mehr Rissanteil lag in der überstrichenen Messfläche des Arrays. Negative Vorzeichen bedeuteten, dass der Riss nicht bis zur Mitte des Arrays reichte, je kleiner der Wert war, desto weniger Rissanteil lag in der überstrichenen Messfläche des Arrays.

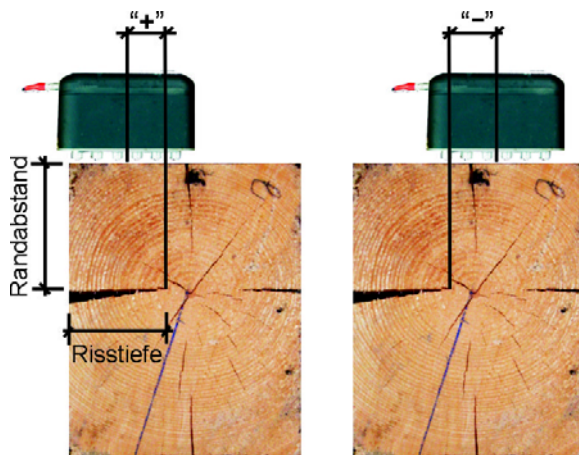


Abb. 65: Vorzeichendefinition des Abstandes der Risswurzel von der Arrayachse

Die folgende Tab. 11 gibt eine Auswahl der untersuchten Risse wieder. Die Erkennung einer hinter dem Riss liegenden Reflektionsebene ist wegen des Arrays bei kleinen Rissen und aufgrund von Beugung begrenzt möglich. Sind die Risse klein genug, können die Schallwellen zudem die Rissufer umlaufen und werden am Rissende zurück in den Holzkörper übertragen. Dahinter liegende Reflektoren können erkannt werden. Große Risse schatten die dahinter liegenden Bereiche ab.

Tab. 11: Risse quer zur Schallausbreitungsrichtung, Detektion bei 55 kHz und 2,5 cm Raster

Holzart	Prüfkörper	Risstiefe vom Rand [mm]	Abstand Risswurzel-Arrayachse [mm]	Randabstand [mm]	Signal Riss	Signal der Rückwand
Kiefer	AP-KI-4b	26	-38	97	ja	ja
Fichte	AP-FI-4-b	18	-32	53	ja	ja
Kiefer	AP-KI-4a	33	-30	78	ja	ja
Fichte	AP-FI-4-b	13	-12	75	ja	ja
Fichte	AP-FI-4-a	11	-8	91	ja	ja
Lärche	AP-LA-4-a	5	-17	83	ja	ja, gedämpft
Fichte	AP-FI-4-b	18	-7	52	ja	ja, gedämpft
Lärche	AP-LA-4-a	38	4	96	ja	ja, stark gedämpft
Lärche	AP-LA-4-a	17	8	82	ja	ja, gedämpft
Fichte	AP-FI-4-a	13	13	91	ja	nein
Fichte	AP-FI-4-a	20	17	72	ja	nein
Lärche	AP-LA-4-a	10	26	73	ja	nein
Fichte	AP-FI-4-a	20	45	74	ja	nein
Kiefer	AP-KI-4b	11	-14	71	nein	ja, gedämpft
Kiefer	AP-KI-4b	13	-12	98	nein	ja

Das Ultraschallechoverfahren reagiert sehr empfindlich auf Risse innerhalb des Holzkörpers, da die Wellen an den Rissufern entlang laufen und wieder in den Holzkörper übertragen werden. So können verlängerte Laufzeiten, deutliche Signalverschiebungen und Auslöschungen eintreten. Deren Deutung bei unbekanntem Bauteilzustand ist schwierig. Bei der Untersuchung der geschädigten Balken waren durch Rissbildung oft nur dünne oberflächen-nahe Holzschichten vorhanden. Diese machen sich entsprechend der geringen Dimension und den sich mehrfach überlagernden Echos als deutliche Amplituden bemerkbar und dominieren den oberen Laufzeitbereich. Die Erkennung einer solchen dünnen Holzschicht ist aufgrund der über dem sonstigen Amplitudenniveau liegenden Signale und, je nach Stärke der Schicht, durch das periodische Signalbild gut möglich. Zu dahinter befindlichen Bereichen werden keine Informationen erhalten. Nach den hier durchgeführten Untersuchungen können folgende qualitative Aussagen getroffen werden.

Die Risserkennung verbessert sich bei:

- großen Risstiefen,
- durchgehenden Risslängen,
- geringem Randabstand der Risse von der Prüfebene (außerhalb der Laufzeit der Oberflächenwellen, eine Rückrechnung über das Mehrfachecho ist möglich),
- höherem Lageanteil des Risses unter dem Array (positives Vorzeichen gemäß Abb. 65),
- kleineren Rissen, wenn sie von den Querschnittsseiten ausgehen (Eckriss) sowie
- feuchteren und dichterem Hölzern

Das Erkennen von teilweise hinter dem Riss liegenden Reflektionsebenen (z. B. Rückwand) ist nur dann möglich, wenn:

- kleine Risstiefen,
- große Randabstände der Risse von der Prüfebene sowie
- geringe Anteile des Risses unter dem Array (negatives Vorzeichen gemäß Abb. 65)

vorhanden sind. Äste und Risse treten beim Holz oft gemeinsam auf und führen zu sich überlagernden Signalbildern. Wie bereits begründet, werden über die Oberflächenwellen Risse und Äste im oberflächennahen Bereich durch Wellendämpfung markiert. Tiefer liegende Äste und Risse sind Reflexionsebenen, deren Unterscheidung über die Untersuchung der Signalausdehnung (Risslänge, Astverlauf) möglich sein kann.

6.2.2.7 Schadensübergangsbereich

Der Übergangsbereich zwischen geschädigten und ungeschädigten Holzpartien stellt bei der Detektion von außen nicht einsehbarer Schädigungen einen wichtigen Aspekt bei der Untersuchung bestehender Holzkonstruktionen dar. Wichtig ist die Abgrenzung des völlig oder teilweise zerstörten Bereiches von der gesunden Holzsubstanz. Insbesondere Auflager- oder Kreuzungspunkte erfahren durch Erhöhung des in der Baufuge kapillar gebundenen Wasseranteils bei gleichzeitig verringerter Feuchtigkeitsabgabe durch mangelnde Luftumspülung häufiger eine Schädigung. Die Holzzerstörung geht dann meist von den äußeren Holzpartien aus und setzt sich zum Querschnittsinneren und in Achsrichtung des Bauteils fort. Bei Untersuchungen ist es notwendig, charakteristische Signalprofile zu kennen, um sie einer Schädigung zuzuordnen. Mit dem Ultraschallechoverfahren wurden mehrere Übergangsbereiche von Fichten- und Kiefernholz untersucht. Das bei den Balken bereits bestehende Raster wurde verdichtet, um höhere Auflösungen zu erzielen. Die Untersuchungen erfolgten im Hinblick auf praktikable Lösungen vor Ort von der intakten Seite.

Die Referenz bei der Beurteilung bestehender Konstruktionen ist das Rückwandecho, denn bei Schäden auf der Rückwand bleibt dieses aus [Hasenstab und Krause, 2006]. Nach den Messungen mit dem verdichteten Raster im Übergangsbereich kann dies prinzipiell bestätigt werden. Entgegen den Erwartungen kam es jedoch zu einem abrupten Signalverlust (Abb. 66 bis Abb. 68). Das Signal der Rückwand ist auch im Übergangsbereich zwischen nahezu intaktem und völlig geschädigtem Material zu finden. Erst bei starker Schädigung fehlt das Echo. Der Übergang vom optisch intakten zum völlig destruierten Balkenbereich war deshalb nicht differenzierbar. Die chemische Zusammensetzung bezüglich der Hauptinhaltsstoffe des Holzes wurde im Übergangsbereich untersucht (Anhang Abschnitt A 4.4). Danach wurde mit zunehmender Braunfäuleschädigung eine Abnahme des Anteiles der Zellulose und eine Zunahme der Anteile der Hemizellulosen und des Lignins festgestellt. Mit der Methode der Laufzeitgruppierung wird diese Veränderung der Zusammensetzung der Hauptinhaltsstoffe im Schadensübergangsbereich nicht differenziert abgebildet. Neben diesen chemischen Veränderungen beeinflussen die mit der Schädigung einher gehende Mikro- und Makrorissbildung oder die Reduzierung der Rohdichte die akustischen Eigenschaften des Holzes.

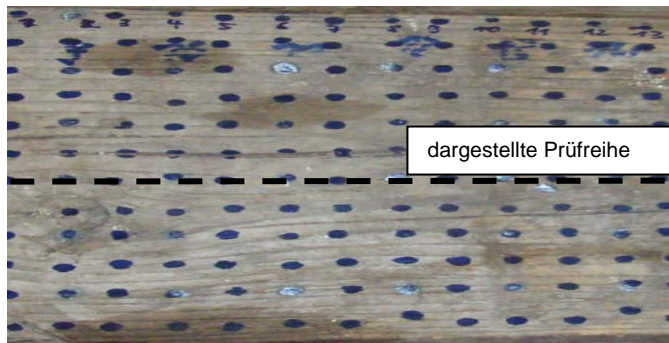


Abb. 66: Prüfseite der Übergangszone, ungeschädigte Oberseite eines Fichtenbalkens, Grafik aus Darstellungsgründen längs verzerrt



Abb. 67: Geschädigte Unterseite des Fichtenbalkens, Grafik aus Darstellungsgründen längs verzerrt

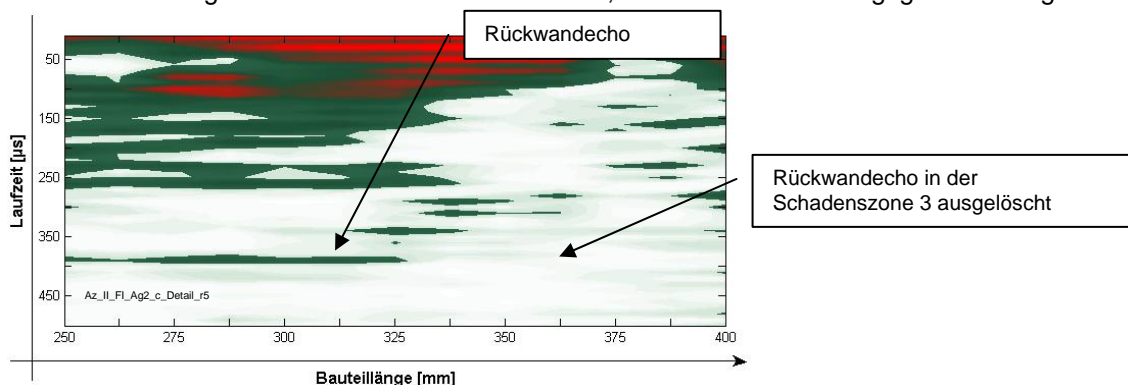


Abb. 68: Rückwandsignal bei 385 µs ist in der Übergangszone eines geschädigten Fichtenbalkens ab etwa 325 mm durch die Schädigung nicht mehr vorhanden (25 kHz, Raster 1,25 cm)

Einige holzerstörende Pilze verursachen eine von außen nicht sichtbare Innenfäule, bei der der kernnahe Querschnitt durch Substratmyzel abgebaut wird. Allseitig wird der zerstörte Holzbereich von intakt erscheinendem Holz umschlossen. Ein durch Kiefernbaumschwamm [*Phellinus pini* (Brotero: Fr.) A. Ames] geschädigter Balken stand zur Verfügung, bei dem ein 0,5 cm bis 1,5 cm breiter tangentialer Bereich geschädigt war (Abb. 69). Die von der äußeren Kernzone beginnende Schädigung ist scharf von der umgebenden Holzsubstanz abgegrenzt, so dass die Übergangszone nur geringe Ausdehnung besitzt.

Sowohl bei der Grobraster- als auch bei der Prüfung mit dem verdichteten Raster konnten von dem tangential geschädigten Bereich deutliche Echosignale empfangen werden. Die Reflexionsebene stellte den Grenzbereich zwischen dem ungeschädigten und dem quasi nicht mehr vorhandenem Holzpartien dar. Durch diesen schroffen Übergang ist der Sprung der akustischen Eigenschaften offenbar groß genug, um eine Reflexion zuzulassen (Abb. 70). Diese besondere Art der Schädigung erinnert im Sinne der akustischen Eigenschaften an einen tangential verlaufenden Riss und wird vergleichbar detektiert. Für die

Praxis bedeutet das allerdings, dass spezielle Schadensbilder nicht durch Ausbleiben des Echos erkannt werden. Die Abgrenzung zu einer Detektion eines Risses beispielsweise besteht im aufgeführten Fall darin, dass die Echosignale die Prüfebene im Kernbereich des Balkens betreffen. Die Ergebnisse der Untersuchungen der Übergangsbereiche weisen darauf hin, dass der Übergangsbereich unter den hier bestehenden Material- und Schadensbedingungen nicht differenziert werden kann. Eine starke Schädigung führt zur Signalauslöschung. Eng begrenzte Schadensstellen besitzen dementsprechend eine zu geringe Zone zur deutlichen Dämpfung und Auslöschung der Signale.

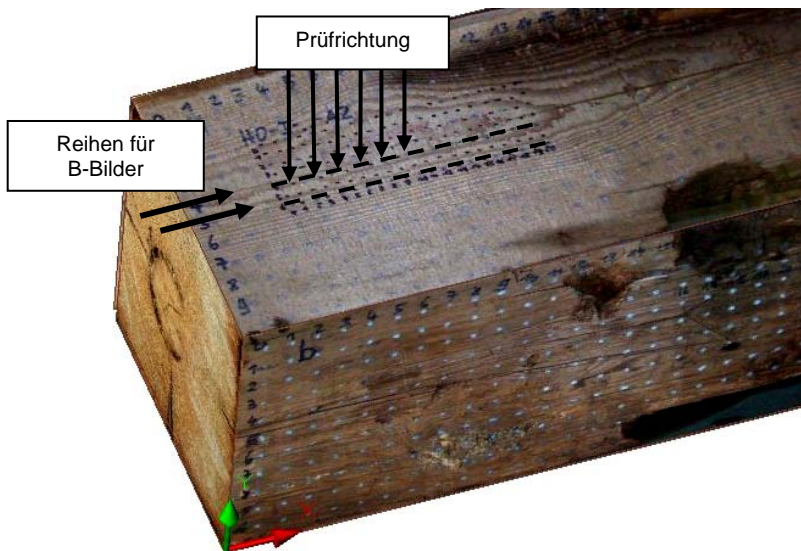


Abb. 69: Kiefern balken mit Innenfäule und umliegender, intakter Holzsubstanz

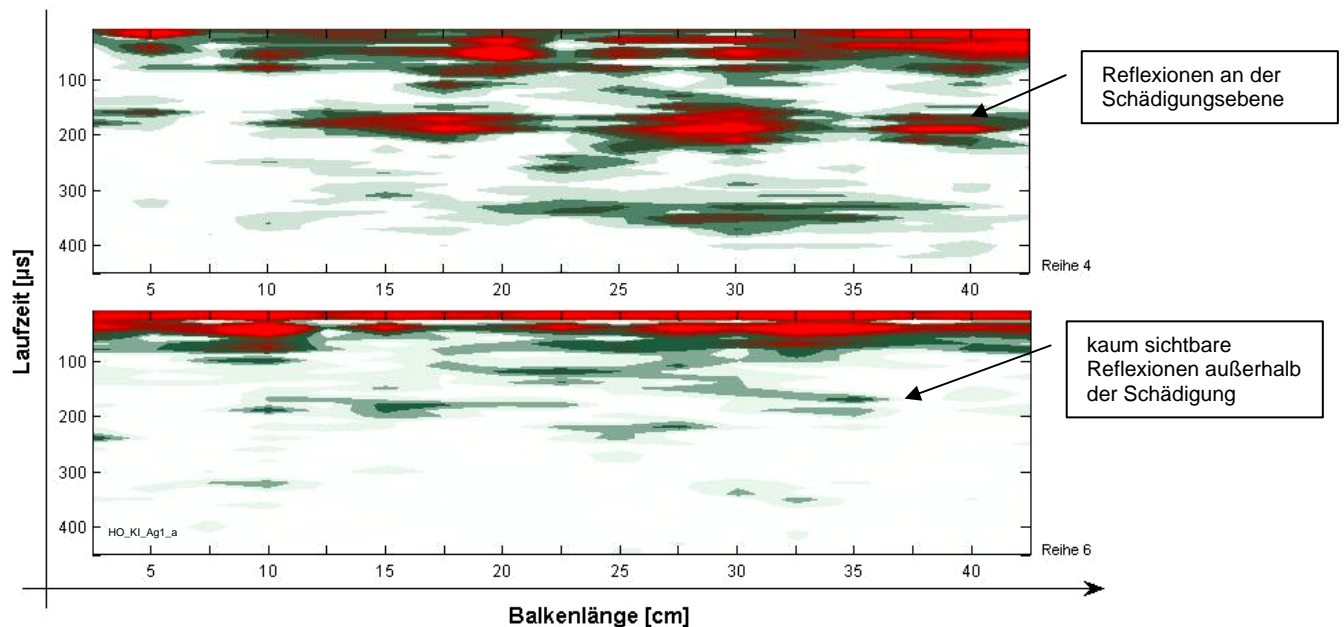


Abb. 70: B-Bilder mit Echo der Grenzfläche im geschädigten Kernbereich der Kiefer (35 kHz, Raster 1,25 cm)

6.2.2.8 Oberflächenwellen

Bei der Durchschallung eines Bauteiles entspricht die Ausbreitungsrichtung der Transversalwelle der Prüfkopfachse und ist im Allgemeinen rechtwinklig zur Bauteiloberfläche gerichtet. Mit der gewollten Schwingungsanregung der oberflächennahen Holzzellen werden durch den elastischen Verbund der Zellen Schwingungsanteile auch senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Transversalwellen, also in Faserrichtung, übertragen. Der elastische Verbund führt zur wellenförmigen Verformung eines Oberflächenbereiches, so dass von einer beeinflussenden Eindringtiefe der Oberflächenwellen gesprochen werden kann. Die Wellen selbst werden durch die eng aneinander gereihten Sende- bzw. Empfangsprüfköpfe registriert und durch die im Vergleich zu den erwarteten Echosignalen hohen Amplituden sehr deutlich registriert. Die in 5.1.1 angegebene Eindringtiefe von $\lambda/2$ bzw. λ (das entspricht z. B. bei $v_{T-II} = 1278 \text{ m/s}$ und $v_{O-II} = 1150 \text{ m/s}$ bei 55 kHz 1,05 cm bzw. 2,1 cm, vgl. Tab. 5) wird in der praktischen Auswertung deutlich überschritten. Das Erkennen eines Echosignals ist erst nach Abklingen der Amplituden der Oberflächenwellen möglich. Innerhalb des von den Oberflächenwellen überlagerten Bereiches sind Reflektionsebenen damit sehr schwer detektierbar. Erst mit dem Ausschwingen und der Amplitudenabnahme können Echosignale erkannt werden. Die Beschreibung beeinflusster Bereiche bezieht sich hierbei auf die Umrechnung der Signale mit den entsprechenden Laufzeiten und der bekannten Schallgeschwindigkeit. Diese sind größer als die durch Oberflächenwellen in Schwingung versetzten Bereiche.

Diese Untersuchungen bestätigen die im Kapitel 5.1.1 getroffenen Aussagen des Einflusses der Oberflächenwellen. Zudem wurde erkannt, dass bei höheren Feuchtegehalten ein längeres Ausschwingen und damit ein größerer Einflussbereich vorhanden waren. Während beispielsweise bei einem Fichtenprüfkörper mit $\omega = 7,4 \%$ ein Einflussbereich von etwa $30 \mu\text{s}$ festgestellt wurde, waren es bei gleicher Skalierung und $\omega = 24,3 \%$ etwa $55 \mu\text{s}$ (Abb. 71). Diese Erkenntnisse wurden für Kiefern- und Lärchenholz bestätigt. Die Einflusstiefe verringerte sich auf bis zu $1/3$ bei niedrigerem Feuchtegehalt.

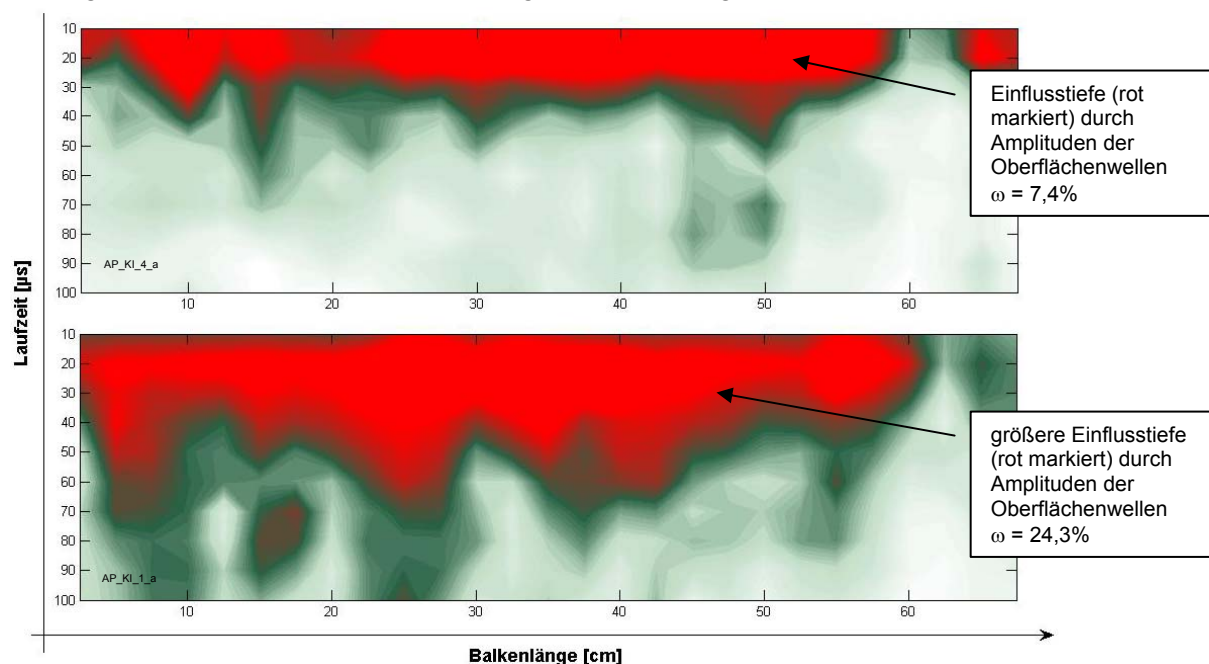


Abb. 71: B-Bild (gereimte Einzelbilder) eines Fichtenbalkens, $\omega = 7,4 \%$ (oben), $\omega = 24,3 \%$ (unten) und mit farblich codierten Amplituden (55 kHz, Raster 2,5 cm)

Wie in 6.2.2.4 festgestellt, muss bei steigendem Feuchtegehalt mit abnehmender Schallgeschwindigkeit gerechnet werden, so dass auch der Einflussbereich durch Verlangsamung der Wellengeschwindigkeit und Vergrößerung der Laufzeit der Wellen erhöht werden würde. Ob durch geringere Dämpfung feuchten Holzes eine größere Nachschwingung zur Vergrößerung des Einflussbereiches der Oberflächenwellen führt, wurde nicht untersucht.

Der Einfluss der Rohdichte auf die von den Oberflächenwellen beeinflussten Bereiche konnte bei einem Vergleich eines Fichtenbalkens mit $\rho_{12} = 0,43 \text{ g/cm}^3$ und eines Kiefern balkens mit $\rho_{12} = 0,54 \text{ g/cm}^3$ nicht nachgewiesen werden.

Ein beobachtetes Phänomen im B-Bild waren Amplituden, die von den Randprüfflächen ausgehend schräg nach unten verliefen (Abb. 72). Die Amplituden waren zwar nicht immer so deutlich, jedoch in vielen Fällen zumindest im äußeren Ansatz vorhanden. Diese Amplitudenverteilung kann nur mit Reflexionen der seitlichen Begrenzungsflächen der in der Regel 70 cm langen Balken begründet werden, denn die Laufzeit nimmt offenbar stetig und für diese geringen Dimensionen annähernd linear zu, so dass sich ein schräg linear verlaufendes Amplitudenbild ergibt. Bei der Prüfung langer Bauteile treten diese Reflexions-signale im Randbereich auf und sind mit zunehmendem Randabstand nicht mehr erkennbar.

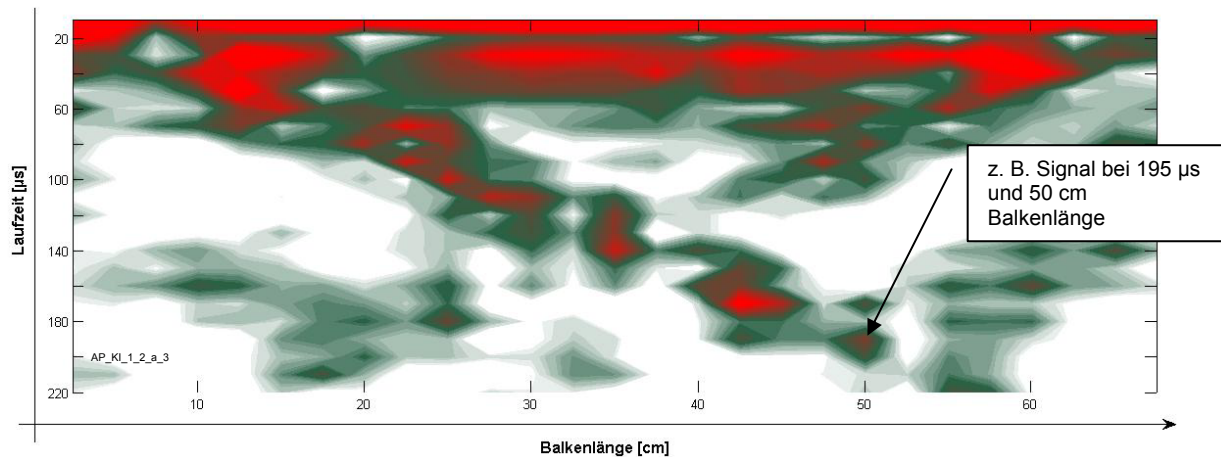


Abb. 72: B-Bild mit beidseitig diagonal verlaufendes Echosignal eines Kiefernprüfkörpers (55 kHz, Raster 2,5 cm), das Rückwandecho bei 360 μs ist hier nicht dargestellt

Mit dem Impulseintrag laufen zusätzlich Oberflächenwellen rechtwinklig zur Ausbreitungsrichtung. Die Oberflächenwellen breiten sich dabei in Faserrichtung und quer dazu aus. Die Transversalwellen besitzen eine Geschwindigkeit v_T , die Oberflächenwellen gemäß Gl. A-36 im Anhang von $\approx 0,9 v_T$, wenn für $\mu_{\text{Kiefer}} = 0,3$ nach [Hasenstab, 2006] angesetzt wird. Das Rückwandsignal des in Abb. 72 dargestellten Prüfkörpers lag bei 360 μs , womit sich bei 198 mm Bauteilhöhe die Geschwindigkeit $v_{T\perp II} = 1.100 \text{ m/s}$ errechnet. Mit dieser Geschwindigkeit lässt sich das Amplitudenbild jedoch nicht erklären, da eine Reflexion von den Seitenflächen erst später als oben dargestellt eintreten würde, denn beispielsweise befindet sich ein Signalpeak bei 195 μs bei einem Schallweg von $2 \times 500 \text{ mm} = 1000 \text{ mm}$. Die Geschwindigkeit dieser Wellen beträgt danach $v = 5.128 \text{ m/s}$. Derartig hohe Geschwindigkeiten sind bisher nur bei Longitudinalwellen bei Polarisierung und Ausbreitungsrichtung parallel zur Faser im Holz bekannt. Es muss geschlussfolgert werden, dass bei Anregung der in Faserrichtung polarisierten Transversalwellen-Prüfköpfe eine Longitudinalwelle in dem oberflächennahen Bereich ausgelöst wird.

Das ist erklärbar durch die Schwingungsbewegung des Prüfkopfes rechtwinklig zur Prüfkopfchse. Die Longitudinalwellen laufen an den Oberflächen zur jeweiligen

Querschnittseite und werden an deren Kanten reflektiert. In den frühen Laufzeitbereichen überlagern sich Schwingungen der beschriebenen Longitudinal- und Oberflächenwellen.

6.2.2.9 Arrayankopplung

Im Rahmen der Untersuchungen wurde geprüft, ob Riss- oder auch Rückwandechos auch dann registriert werden, wenn nicht alle 24 Prüfköpfe aufliegen. Das tritt in der Praxis beim randnahen Abrastern von Bauteiloberflächen in der Regel auf. Die Signale waren bei unvollständigem Aufliegen bzw. Ankoppeln der Prüfköpfe etwas schwächer, jedoch vorhanden. Beispielhaft ist in Abb. 73 dargestellt, dass trotz Reduzierung der schallgebenden Prüfköpfe um 2/3 noch auswertbare Signale empfangen werden können. Unterschiedliche Ankopplungsbedingungen der 24 Arrayköpfe, wie sägeraue Teilbereiche der Oberflächen oder Teilschädigungen des Balkens, lassen meist eine Signalauswertung zu.

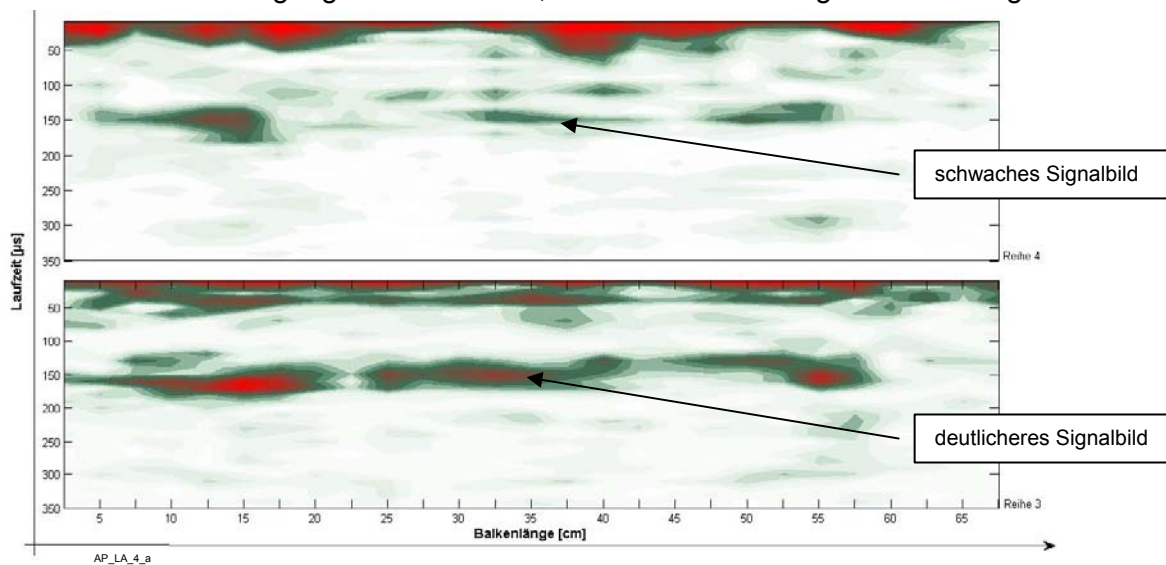


Abb. 73: Amplitudenvergleich der B-Bilder eines Rissechos bei unterschiedlichen Ankopplungsbedingungen, Reihe 4 (oben) mit Kontaktfläche Empfänger-/Sendeblock von 1/0,33 und in der Reihe 3 (unten) mit 1/1 (55 kHz)

In vielen Fällen wurden Echosignale (z.B. Rückwand) mit einer Auslöschung zum Bauteilrand hin festgestellt. Die Nähe zu den seitlichen Begrenzungsflächen verursacht offenbar eine besonders starke Dämpfung des Signals, beispielsweise durch Umwandlung in andere Wellenarten. Durch den Rand wird die Ausbreitung des Schallfeldes behindert. Dieser Effekt existiert ebenso für die Mehrfachechos. Der seitliche Abstand, bei dem kein Echo registriert wurde, war abhängig von der Laufzeit. Inhomogenitäten lassen sich im Randbereich daher kaum lokalisieren. Es besteht eine Abhängigkeit von der Prüfkörpergeometrie.

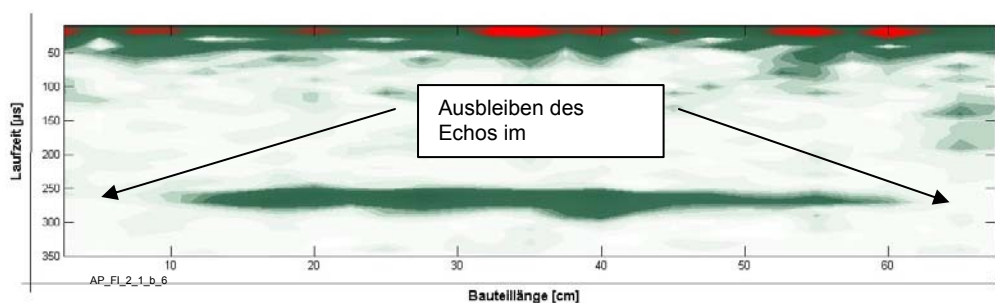


Abb. 74: Rückwandsignal mit seitlicher Signalauslöschung

6.2.3 Zusammenfassung der Ergebnisse der Ultraschallechomessungen

Äste, Risse und Pilzschädigungen lassen sich insgesamt gut ermitteln. Das Potenzial des Verfahrens, wesentliche Sortierkriterien einer Balkenkonstruktion zu erfassen, ist gegeben und bietet den Vorteil einer schnellen Dokumentation insbesondere bei umfangreichen Prüfaufgaben.

Bei praxisüblichen Holzquerschnitten sind mit der gewählten Prüfmethode oberhalb von 100 kHz Signale kaum auswertbar, so dass vorrangig im niederfrequenten Spektrum zwischen 25 kHz und 55 kHz gemessen wurde. Die mit der **Laufzeitgruppierung** durchgeführten Auswertungen der C-Bilder erwiesen sich, ausgenommen der Detektion der Schadensübergangsbereiche, als Vorteil gegenüber dem herkömmlichen Verfahren.

Bei alleiniger Betrachtung der **Rohdichte** ließ sich ein deutlicher Zusammenhang erkennen, dass bei steigender Rohdichte eine Steigerung der Schallgeschwindigkeit bei den Transversalwellen festzustellen ist. Insbesondere die Lärchenhölzer mit $\rho_{12} = 0,55 \text{ g/cm}^3$ zeigten eine deutliche Korrelation mit $r_{xy} = 0,90$ unter Beachtung der gegebenen Rohdichtespanne der Prüfkollektive.

Insgesamt ließen sich die Lärchenhölzer besser mittels Ultraschallechotechnik untersuchen, da die Schallleitung und damit die Amplitude deutlicher waren. Auch die dichteren Kiefernholzarten zeigten gegenüber der Fichte diesbezüglich Vorteile. Offenbar wird auch die Dämpfung entsprechend verringert. Das Holzgewebe ist so starr verbunden, dass die Schwingungsübertragung mit weniger Verlusten behaftet ist. Gleichzeitig ist jedoch auch ein höherer Energieeintrag zur Anregung erforderlich, worauf mit einer Reduzierung der Frequenz reagiert werden kann.

Der **Feuchtegehalt** stellt eine weitere ganz wesentliche Einflussgröße auf die Schallleitung des Holzes dar, denn mit steigendem Feuchtegehalt wurde für die Prüfserien eine abnehmende Schallgeschwindigkeit registriert (z. B. Fichte $r_{xy} = 0,94$).

Eine Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von den durchschallten **Querschnittsbereichen** konnte nicht ermittelt werden.

Äste in Schallausbreitungsrichtung verursachten bei einem Durchmesser $> 10 \text{ mm}$ eine deutliche Dämpfung bzw. Auslöschung der Oberflächenwellen. Astdurchmesser $\leq 16 \text{ mm}$ führten zu noch keiner vollständigen Abschattung. Durch über den Astquerschnitt verteilte Schwindrisse oder auch durch die Trennung der Rinde bei Schwarzästen wurden die Oberflächenwellen im Allgemeinen ausgelöscht.

Äste quer zur Schallausbreitungsrichtung konnten je nach deren Abstand von der Prüfebene (Schallquelle) ab 20 mm Durchmesser erkannt werden. Abschattungen traten in Abhängigkeit von der Astgröße und den Abständen von der Prüfebene bzw. der dahinter liegenden Reflexionsebene ein.

Risse an der Oberfläche in Schallausbreitungsrichtung führten zur Dämpfung bzw. Auslöschung der Oberflächenwellen. Gegenüberliegende Risse können in Abhängigkeit ihrer Größe durch Ausbleiben des Rückwandsignals erkannt werden.

Risse quer zur Schallausbreitungsrichtung wurden in Abhängigkeit von der Risttiefe und -länge und der Lage in Bezug auf das Prüfkopfarray gut erkannt. Die Detektion hinter dem Riss befindlicher Reflektoren war unter bestimmten Voraussetzungen möglich. Insgesamt ist das Ultraschallechoverfahren gegenüber Rissen sehr sensibel und es kommt zu

Mehrfachreflexionen und Überlagerungen. Dadurch ließen sich besonders trockene Althölzer durch deren höheren Anteil an Rissen etwas schlechter untersuchen.

Durch **Pilzbefall** geschädigte Querschnittsbereiche ließen sich gut von ungeschädigten abgrenzen. Der zwischen gesundem und zerstörtem Holz befindliche Übergangsbereich konnte unter Anwendung der Laufzeitgruppierung nicht differenziert werden. War der Übergang von geschädigtem zu intaktem Holz abrupt, teilweise mit einer Rissbildung vergleichbar, wurden die Wellen nur wenig gedämpft und es konnten Echosignale der Schadensfront empfangen werden.

Oberflächennahe Inhomogenitäten wurden durch die **Oberflächenwellen** nur schwer oder nicht erkannt. Steigende Feuchtegehalte erhöhten den davon beeinflussten Laufzeitbereich. Neben den Oberflächenwellen führten in Faserrichtung initiierte **Longitudinalwellen** zu weiteren Signalüberlagerungen.

6.3 Bohrwiderstand

Werden potenziell auffällige Konstruktionselemente durch das Ultraschallechoverfahren ermittelt, kann eine Referenzierung auf Grundlage des Bohrwiderstandsverfahrens erfolgen. Die Eignung und die Möglichkeiten des Bohrwiderstandsverfahrens werden im folgenden Kapitel untersucht.

6.3.1 Methodik

6.3.1.1 Prüfeinrichtung

Für die Untersuchungen wurde das Bohrwiderstandsmessgerät Resi F 400 S der Firma IML GmbH aus Wiesloch verwendet. Das Unternehmen begann 1990 mit der Entwicklung praxistauglicher Geräte und produziert seit 1992 in Serie, so dass auf weit reichende Erfahrungen bei der Geräteanwendung zurückgegriffen und die Gerätetechnik als ausgereift eingeschätzt werden kann.

Zur Vergleichbarkeit aller Messungen wurde ausschließlich mit einer relativ geringen Vorschubgeschwindigkeit von 25 - 30 cm/min gearbeitet. Bei einem hohen Vorschub der Messschreiber auf der gleichen Wegstrecke wirkt sich die Trägheit des Aufzeichnungsmechanismus nachteilig aus, so dass die Messauflösung etwas ungenauer wäre. Liegen die Amplituden zu nah am Maximalbereich, ist eine Dämpfung des Messwertausschlages über das Vorschalten einer Feder möglich. Zur Festlegung geeigneter Einstellungen wurden Vorversuche durchgeführt und die Konfigurationseinstellungen geprüft.

Die Bohrungen erfolgten ausschließlich in vertikale Richtung, wobei das Gerät auf drei kegeligen Metallspitzen aufgestellt wird, um ein Verrutschen zu verhindern. Das Verkanten kann bei Bewegungen jedoch auch ohne Verrutschen des Gerätes eintreten. Um ein Verkanten auszuschließen, wurde eine Haltevorrichtung gebaut, in die das Bohrwiderstandsmessgerät eingespannt und damit horizontal und vertikal fixiert wurde. Bei den Vorortmessungen und bei Labormessungen an Balken mit einer Querschnittshöhe > 25 cm kam die Einspannvorrichtung nicht zum Einsatz, so dass bei Auswertung der Messungen ein möglicher Anwenderfehler durch Verkanten berücksichtigt werden musste.

6.3.1.2 Holzprismen

6.3.1.2.1 Sperrholzprismen

Da systematische grundlegende Daten nur lückenhaft verfügbar sind, wurden mehrere Versuchsreihen durchgeführt, die die Basis für die anschließenden Praxismessungen bilden. Die besondere Problematik bestand darin, dass durch die auftretenden Inhomogenitäten und strukturellen Störungen deren spezifische Einflüsse am Bauteil vor Ort schwer separiert werden können. Quasihomogene Bedingungen wurden aus diesem Grund unter Herstellung von Sperrholzprobekörpern simuliert und an diesen Messungen durchgeführt. Aus einer 2,6 cm starken Furniersperrholzplatte wurden Probekörper mit 2,6 cm Breite und 4,9 cm Länge herausgesägt und geprüft. Von Vorteil ist, dass die einzelnen Lagen parallel und ungekrümmt angeordnet sind und dadurch ein reproduzierbares Bohren ermöglichen.

Holzfehler, wie zum Beispiel Äste, treten praktisch nicht auf. In geringem Maße kommen kleine Hohlstellen vor. Nach der Prüfung mit unterschiedlichen Einstellparametern wurden zusätzlich Umkehrbohrungen durchgeführt, um zu unterscheiden, ob ein struktureller oder ein verfahrensbedingter Trend im Bohrprofil vorliegt. Die Ergebnisse der Voruntersuchung sind im Anhang dargestellt.

6.3.1.2.2 Druck-, Biege- und Schlagbiegeprismen

Je nach Beschaffenheit des Balkens wurden die Probekörper selektiv aus verschiedenen Balkenabschnitten heraus getrennt. Zum Teil fand der gesamte Querschnitt zur Prismenherstellung Verwendung (vgl. Abb. 27).

Jeder Druck-, Biege- und Schlagbiegeprüfkörper wurde nach der Ermittlung der Bruchfestigkeit mittels Bohrwiderstand geprüft. Bei einem Teil der Prüfkörper wurden die jeweiligen Bruchstücke in den zwei orthogonal zueinander liegenden Richtungen geprüft.

Die Bohrrichtung wurde in den drei Orientierungen von der Schnitt- bzw. Aufstandsfläche ausgehend definiert. In den äußeren Stammbereichen war die Einstufung in eine radiale und tangential Bohrrichtung gut möglich. Wenn der Jahrringverlauf etwa im Winkel von 45° über den Querschnitt vorhanden war, erfolgte die Einstufung als tangential/radiale Bohrrichtung. Die Einstufungskriterien waren holzanatomisch bedingt nicht immer deckungsgleich, so dass von einer Annäherung mit überwiegendem Radial- oder Tangentialanteil ausgegangen wurde.

6.3.1.3 Balken

An den Balkenquerschnitten erfolgten Messungen von allen Seiten, um nach Gegenüberstellung der spiegelgleichen Seiten den Bohrtrend eliminieren zu können. Die Ermittlung des Bohrwiderstandes der gegenüberliegenden Seiten erfolgte vorzugsweise nahe der bezogenen Prüfebene. Der Versatz über die Balkenlänge betrug dann minimal 2,5 cm. Systematisch wurden in der jeweiligen Rasterspalte die Messungen über die gesamte Balkenbreite an zwei Seiten und an den jeweils gegenüberliegenden Seiten über etwa 1/2 bis 2/3 des Querschnittes durchgeführt. Je nach geometrisch-struktureller Beschaffenheit wurden so rund 20 Messungen je Probekörper durchgeführt. Im Bereich der Schadensübergangszonen wurde das Prüfraster verdichtet und zusätzlich gemessen.

Die Lagerung der Balken erfolgte unter definiertem Klima. Teilweise fand nach der ersten Prüfung eine erneute Klimalagerung statt, um mit verändertem Feuchtegehalt die Prüfungen zu wiederholen. Diese Bohrwiderstandsprüfung wurde vorzugsweise direkt neben den bereits durchgeführten Bohrungen gesetzt, um den anatomischen Einfluss möglichst gleichmäßig in die Kennwertermittlung eingehen zu lassen und damit die Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

6.3.1.4 Auswertung

Die Bohrwiderstandsmessungen wurden mit der Gerätesoftware als ASCII-Daten exportiert in ein Kalkulationsprogramm eingelesen und weiterverarbeitet.

Aus den Amplituden kann ein mittleres Bohrniveau errechnet werden, das die Auswertungsbasis darstellt. Dieses Niveau kann als mittlere Bohrkurve bei neuem bzw. ungerissenem Holz interpretiert werden. Sind jedoch Fehlstellen wie Risse bei Bohrungen in Randnähe vorhanden, kommt es zur Verfälschung des mittleren Bohrniveaus, da der nicht vorhandene Widerstand im Rissbereich in die Mittelung einfließt. Aus diesem Grund wurde nach einer diesbezüglich immunen Niveaudarstellung gesucht und mit der Integration unter der Bohrkurve gefunden. Dafür ist die Zerlegung des bestimmten Integrals in lineare Teilintervalle bis zu den jeweiligen Wendepunkten notwendig und es ergibt sich eine Integrationsfläche gemäß Gl. A-40 im Anhang.

Das Integral wurde abschließend auf Einheiten pro Millimeter bezogen und stellte die Basis für eine Vergleichbarkeit der Messwerte dar. Für diesen Kennwert wurde die Bezeichnung I_{BW} gewählt und im Folgenden allgemein vom Bohrwiderstand gesprochen. Zur Erfassung der realen Bohrwege für die Ermittlung des Bohrwiderstandes wurde ein Algorithmus entwickelt, bei dem Risse und Fehlstellen innerhalb des Bohrweges erkannt und die daraus bezogenen Bohrwege bei der Ermittlung der absoluten Integration unter der Bohrkurve nicht in die Berechnung einfließen. Auch durchbohrte Äste, die zur Erhöhung des Bohrniveaus führen, wurden herausgerechnet und fließen damit nicht in die Auswertung ein. In Abb. 75 und Abb. 76 sind die nicht berücksichtigten Strecken x_0 markiert, so dass der Bohrweg die Summe aus x_1 und x_2 darstellt. Nur eindeutig zu identifizierende anatomische Besonderheiten fanden Berücksichtigung. Nicht eindeutig zuordenbare Abweichungen gingen in die Berechnung der Bohrwiderstandskennwerte ein.

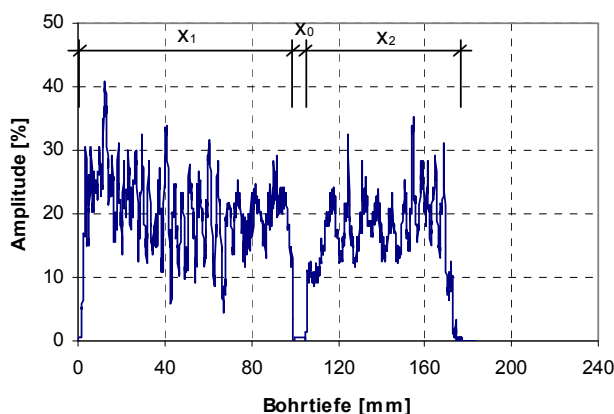


Abb. 75: Bohrwegmarkierung, Strecke x_0 (Schwindriss) ohne Ansatz

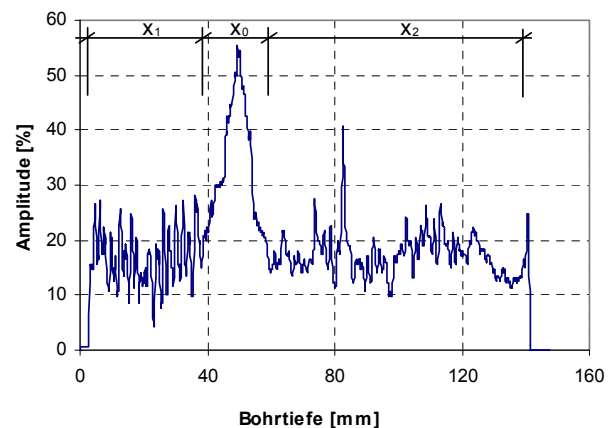


Abb. 76: Bohrwegmarkierung, Strecke x_0 (Ast) ohne Ansatz

6.3.2 Messergebnisse und Auswertung

6.3.2.1 Holzprismen

6.3.2.1.1 Kennwerte

Vor den Prismenprüfungen wurden die Probekörper bei Normklima gelagert und deren Ausgleichsfeuchtigkeit gemäß DIN 52183 bestimmt. Die Ausgleichsfeuchte der geschädigten Altholzprismen lag unter der des Neu- bzw. ungeschädigten Altholzes. Bei den ungeschädigten Fichten-Altholzprismen war im Vergleich zu den Neuholzprismen eine reduzierte Ausgleichsfeuchte von $\omega = 0,4 \%$, bei den Kiefern-Altholzprismen von $\omega = 2,4 \%$ zu erkennen. Die Streuungskennwerte wurden in Tab. A-3 im Anhang zusammengestellt und spiegeln die divergierende Herkunft und Vorgeschichte der Quellbalken wider. In den Prüfkategorien für Neuholz sowie ungeschädigtes und geschädigtes Altholz wurden Variationskoeffizienten im Bereich von $v = 6 \%$ - 14% ermittelt. Die Prismen besitzen verschiedene Rohdichten je nach Quellbalkenherkunft und Lage innerhalb des Stammquerschnittes aufgrund juveniler und adulter Bereiche. In Abb. 77 ist zu erkennen, dass die mittlere Rohdichte der ungeschädigten Altholzbalken sowohl für Fichte als auch für Kiefer über der des Neuholzes liegt. Bei dem Alter der aus dem Bestand entnommenen Balken und unter Berücksichtigung der Gebäudekategorie könnten, wie bereits im Kapitel 6.2.2.1 vermutet, bewusst höherwertige Hölzer mit höherer Rohdichte verbaut worden sein. Die Neuholzer lagen im Mittelwert bei nur $\rho_{12} = 0,44 \text{ g/cm}^3$ (Fichte) und $\rho_{12} = 0,46 \text{ g/cm}^3$ (Kiefer) und die Variationskoeffizienten für das Neuholz bei 8% für die Fichte und 10% für die Kiefer. Die Tab. A-4 im Anhang gibt einen Überblick über die ermittelten Rohdichten und ausgewählte statistische Kenngrößen.

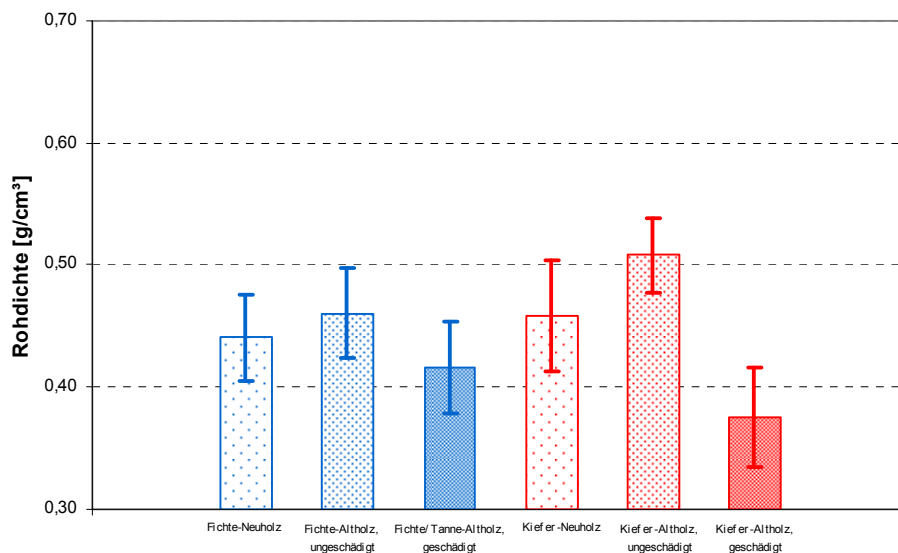


Abb. 77: Rohdichtemittelwerte der Prüfkategorien für Fichte und Kiefer bei $\omega = 12 \%$

6.3.2.1.2 Bohrwiderstand von Neu- und Altholz

Im ersten Schritt wurden alle Messungen gemeinsam nach den Kategorien Neu-, ungeschädigtes und geschädigtes Altholz ausgewertet. Das Ergebnis (Abb. 78) zeigt Unterschiede des Bohrwiderstandes in Abhängigkeit von den Prüfkategorien sowohl für das Fichten- als auch für das Kiefernholz, wobei der Bohrwiderstand bei den Althölzern höher ist als bei den Neuholzern. Mit dem Bohrwiderstand sind die geschädigten Kiefernprismen sehr gut von den

ungeschädigten Proben abzugrenzen. Auffällig sind hohe Variationskoeffizienten der Prüfkategorien, insbesondere die der geschädigten Kiefernholzer, bei denen aufgrund differierender Schädigungsgrade deutliche Streuungen auftraten.

Die Bohrwiderstandsverteilungen der Kiefernprismen sind im Vergleich zur Fichte weniger homogen. Nach Ermittlung des Bohrwiderstands für die Holzarten mit Unterscheidung der Neu- und Altholzkategorien lässt sich durchaus eine Parallele zur Verteilung der Rohdichte beim Vergleich mit Abb. 77 herstellen.

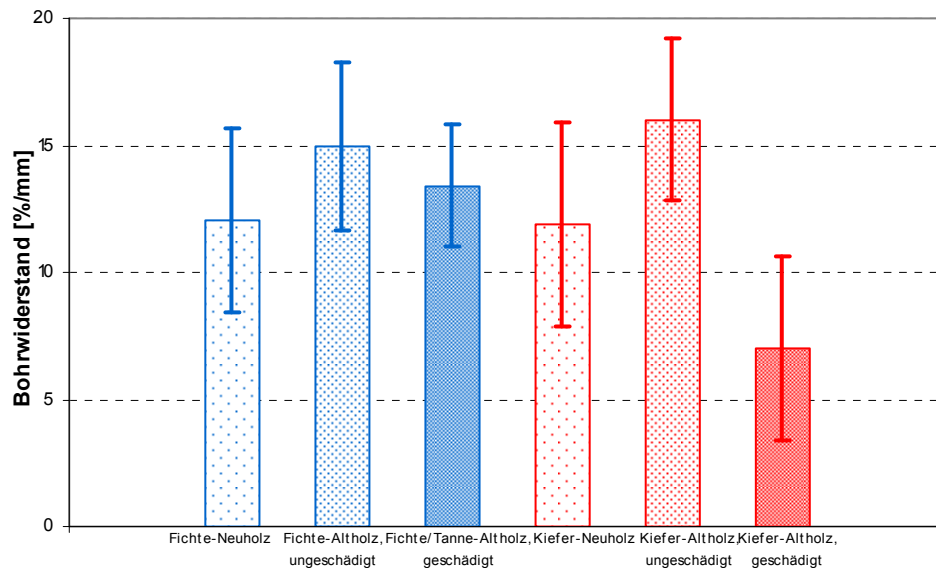


Abb. 78: Bohrwiderstand der Prüfkategorien der Prismen

Alle Bohrungen wurden mit Dokumentation der Jahrringrichtung an Prüfprismen durchgeführt, um hinsichtlich des Tangential- bzw. Radialanteiles auswerten zu können. Zunächst wurden die Prüfkörper nach den anatomischen Richtungen differenziert und die für die jeweilige Richtung typischen Bohrbilder untersucht. Bei den radialen Bohrungen zeichnen sich die Jahrringe gut ab. Es konnte dabei festgestellt werden, dass bei Bohrung von der rechten Seite die Amplitudendifferenz beim Wechsel vom Früh- zum Spätholz etwas mäßiger ansteigt, als der Abfall der Amplitude beim Übergang vom Spät- zum Frühholz des nächsten Jahrringes. In Abb. 79 ist, abgrenzend von statistischen Begriffen, die rechtssteile Amplitude (Schiefe) innerhalb des Bohrverlaufes erkennbar. Diese Schiefe liegt in der Holzanatomie begründet, da insbesondere bei Fichte der Übergang vom weitleumigen Früh- zum englumigen Spätholz allmählich erfolgt und oft optisch den Eindruck einer Zellstauchung hervorruft. Der Anstieg des Wandanteiles und damit der Rohdichte lässt sich gut nachvollziehen. Erfolgt eine Bohrung in tangentialer Richtung, verwischen sich die Grenzen der Zuwachszonen und die Intensität der Peaks zunehmend und lassen dann mehr oder weniger vollständig nach (Abb. 79 bis Abb. 81).

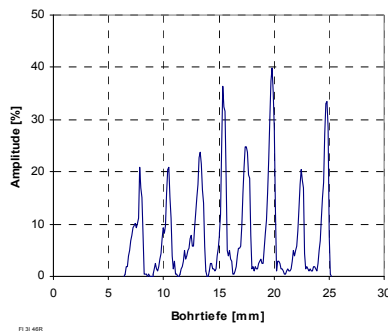


Abb. 79: Radialbohrung mit Kennzeichnung der Lage am Prüfprisma

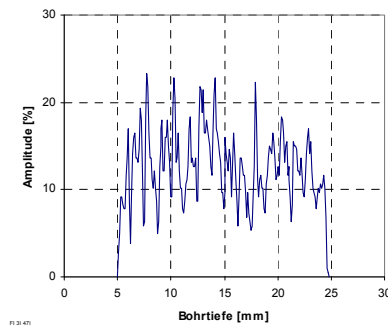


Abb. 80: Tangential-/Radialbohrung mit Kennzeichnung der Lage am Prüfprisma

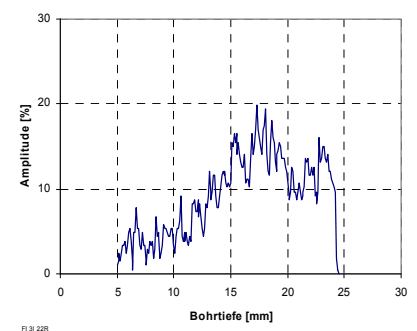


Abb. 81: Tangentialbohrung mit Kennzeichnung der Lage am Prüfprisma

Unter Ansatz der Dokumentation der Bohrrichtung konnte die Auswertung in radialer, tangentialer und tangential/radialer Orientierung spezifiziert werden. Das erfolgte zunächst ohne Berücksichtigung der Rohdichte und des Feuchtegehaltes (Abb. 82). Zumindest für die Kiefer wird deutlich, dass der Bohrwiderstand in tangentialer Orientierung geringer im Vergleich zur radialen Bohrrichtung ist. Bei den Fichtenprüfkörpern ist dies nicht so deutlich. Der Übergang innerhalb des Jahrrings vom Früh- zum Spätholz ist bei Fichte allmählich, während er bei Kiefer eher abrupt ist. Die Ausbildung dieses Überganges spiegelt sich im Bohrwiderstand wider, so dass eine Differenzierung der Bohrrichtungen bei dem Kiefernholz gut möglich ist.

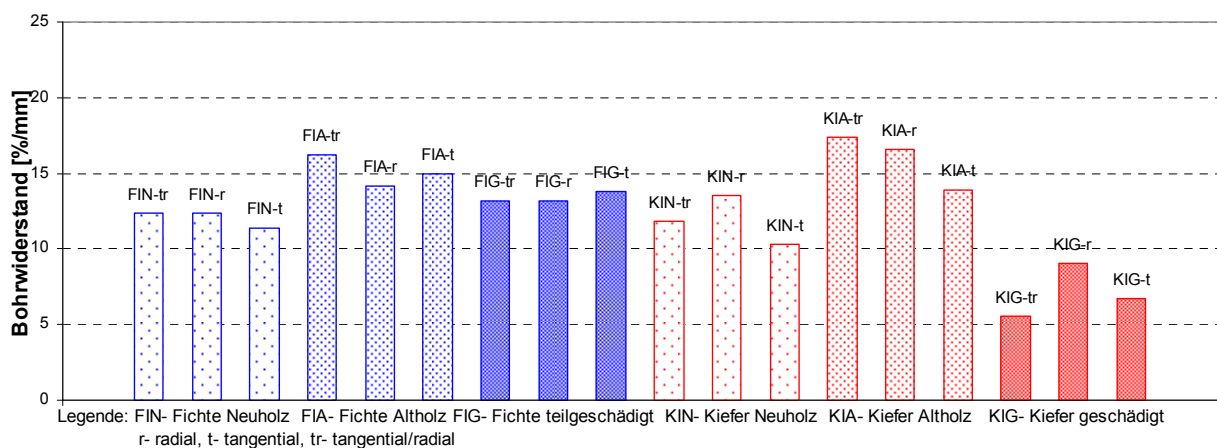


Abb. 82: Zusammenstellung des Bohrwiderstandes für die unterschiedenen Bohrrichtungen

6.3.2.1.3 Rohdichte

Bei Auswertung mit Unterscheidung der Neu- und Altholzkategorien konnte die Verteilung des Bohrwiderstandes mit der der Rohdichte verglichen werden. Zur Überprüfung dieser Abhängigkeit wurden Rohdichteklassen der geprüften Prismen gebildet und innerhalb dieser ausgewertet. Dabei wurden in der Rohdichtespanne von $\rho_{12} = 0,27 \text{ g/cm}^3$ bis

$\rho_{12} = 0,59 \text{ g/cm}^3$ insgesamt 32 Klassen der Schrittweite von $0,02 \text{ g/cm}^3$ gebildet und die Prüfkörperkategorie und zusätzlich innerhalb der Kategorie nach der Orientierung der Bohrung unterschieden.

Zur Auswertung kam der Bohrwiderstand innerhalb der Rohdichteklassen. Um individuelle Einflüsse der Einzelprüfung zu reduzieren und damit die Aussagekraft der Ergebnisse zu stärken, wurde die Anzahl n auf ≥ 20 Einzelwerte der Stichprobe festgelegt. Das war für die Neuhölzer der Fichte und Kiefer, für die ungeschädigten Althölzer der Fichte und die geschädigten Kiefernholzer der Fall. Die Einbeziehung der Rohdichte verringerte die Variationskoeffizienten des Bohrwiderstandes in allen Klassen. In Abb. 83 sind die Variationskoeffizienten für die unterschiedlichen Bohrrichtungen innerhalb der Prüfkategorien dargestellt. Mit dieser Auswertungsverfeinerung von Rohdichteklasse und Bohrrichtung konnten Variationskoeffizienten von beispielsweise $v = 15 \%$ für die Zusammenfassung aller Fichten-Neuhölzer erreicht werden. Die Einzelwerte unter Berücksichtigung der Orientierung innerhalb einer Prüfkategorie wiesen Koeffizienten von zum Teil unter $v = 20 \%$ auf. Die Ergebnisschärfe für die geschädigten Kiefernholzer konnte bis auf $v = 24 \%$ verbessert werden. Die geringste Streuung war innerhalb der Rohdichteklasse zu finden, die den Rohdichtemittelwert der jeweiligen Prüfkategorie beinhaltet (vgl. Kennwerte der Prismen im Anhang).

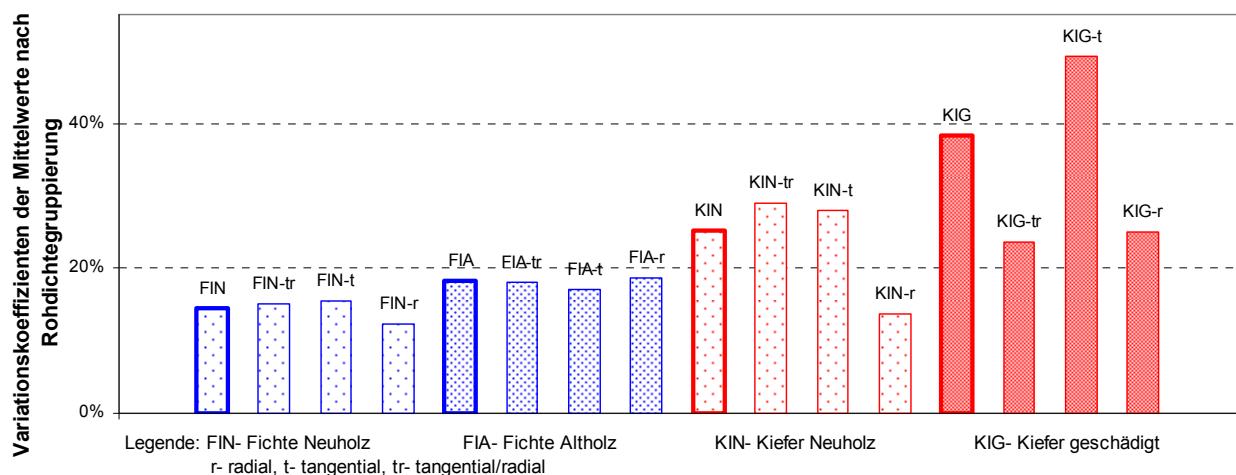


Abb. 83: Zusammenstellung der Variationskoeffizienten des Bohrwiderstandes für die unterschiedlichen Bohrrichtungen

Die bisherigen Erkenntnisse führen zur Ermittlung der Korrelation zwischen Bohrwiderstand und Rohdichte unter Berücksichtigung der Bohrrichtung. Für das geschädigte Fichtenholz und das ungeschädigte Kiefernholz waren nur unzureichende Daten verfügbar.

Es wurde erkannt, dass für die Richtung tangential/radial eine deutlichere Abhängigkeit besteht. Die Streuungen sind überwiegend geringer als der jeweilige Wert der Prüfkategorie aller Richtungen.

Der Korrelationskoeffizient lag für die tangential/radialen Bohrwiderstandswerte der Fichten- und Kiefern-Neuhölzer bei $r_{xy} = 0,66$ (Abb. 84) und für alle Bohrungen der beiden Prüfkategorien bei $r_{xy} = 0,63$ (Abb. 85). Für die Prismen des geschädigten Fichtenholzes konnte kein Zusammenhang gefunden werden.

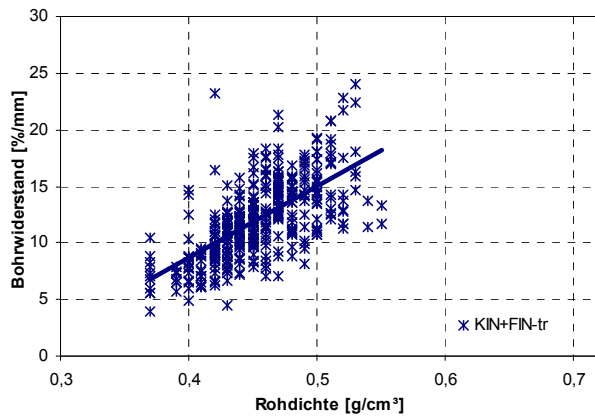


Abb. 84: Zusammenhang zwischen Bohrwiderstand und Rohdichte ($\omega = 12\%$) der tangential/radialen Bohrrichtung der Neuhölzer von Fichte und Kiefer, $r_{xy} = 0,66$

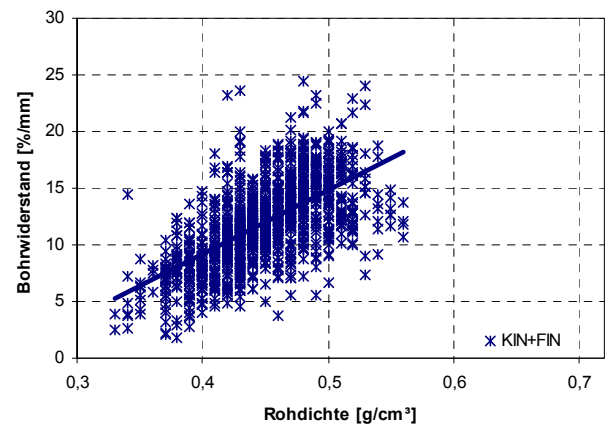


Abb. 85: Zusammenhang zwischen Bohrwiderstand und Rohdichte ($\omega = 12\%$) aller Neuhölzer von Fichte und Kiefer, $r_{xy} = 0,63$

Die Verteilungskennwerte der richtungsabhängigen Regressionsanalysen getrennt nach den Holzarten sind in Tab. A-8 im Anhang zu finden.

6.3.2.1.4 Feuchtigkeit

Die überwiegende Anzahl der untersuchten Prüfkörper hatte eine Ausgleichsfeuchte von $12\% \pm 2\%$. Es wurde erwartet, dass bei Änderung von $\Delta\omega \leq 2\%$ keine signifikanten Änderungen des Bohrwiderstandsintegrals eintreten, so dass die Datensätze unter diesem Aspekt in Klassen zusammengefasst wurden. Je Klasse betrug die Anzahl $n \geq 20$ Einzelwerte der Stichprobe. Bei der Auswertung unter den genannten Bedingungen wurde ohne zusätzliche Rohdichtedifferenzierung eine recht große Streuung innerhalb der Stichproben festgestellt, so dass davon ausgegangen werden kann, dass der Feuchtigkeitseinfluss zu keiner signifikanten Veränderung der Ergebnisse geführt hat. Zur Bestätigung des Ergebnisses und dem Ausschluss der unabhängigen Variable Rohdichte, wurde die Rohdichteklasse ausgewählt, die eine hohe Prüfanzahl innerhalb der Stichprobe und ein möglichst breites Spektrum der Holzfeuchtigkeit aufwies. Für die Rohdichteklasse von $0,44$ bis $0,46 \text{ g/cm}^3$ standen 454 Datensätze zur Verfügung. Die überwiegende Anzahl der Prismen hatte gemäß durchgeführter Klimlagerung ein Feuchtegehalt von rund 12% . Aus einer Gegenüberstellung der Bohrwiderstandswerte bei verschiedenen Feuchtegehalten ist ein Trend innerhalb der relativ geringen Feuchtigkeitsspanne von $9\% \leq \omega \leq 12\%$ nicht ablesbar (Abb. A-1 im Anhang).

6.3.2.1.5 Schadensübergangsbereich

In den vorangestellten Kapiteln wurden alle Prismen in die Auswertung einbezogen. Im Rahmen der Untersuchung des Schadensübergangsbereiches werden nun weitere Kategorisierungen mit den Schadenszonen eingeführt, um weitere Einflussgrößen auf den Bohrwiderstand zu erkennen. Mit dem Abbau durch holzerstörende Pilze wird bei der Braunfäule die langkettige Zellulose in kleinere Bruchstücke aufgespaltet und erst anschließend in körpereigene Stoffe umgewandelt. Die Rohdichte reduzierte sich von den ungeschädigten zu den geschädigten Bereichen hin auf etwa 80% . Dabei ist zu beachten, dass bei Einschnitt und Auswahl der Prismen eine bestimmte Resttragfähigkeit unterstellt wurde und

damit die Rohdichte unter diesem Aspekt bewertet werden muss. Neben der Darstellung aller geprüften Hölzer aus Fichten- und Kiefernholz, wurden die Prismen gesondert betrachtet, die ausschließlich von geschädigten Balken stammten. Für das geschädigte Fichtenholz standen allerdings nur wenige Probekörper der Zonen 2 und 3 zur Verfügung. Eine gleichartige Rohdichtereduzierung war für die den Zonen zugeordneten Prismen der geschädigten Altholzbalken festzustellen. Die Rohdichte reduzierte sich von 100 % (Zone 1) auf etwa 90 % (Zone 2, außer Kiefer) und etwa 80 % (Zone 3), (Abb. 86).

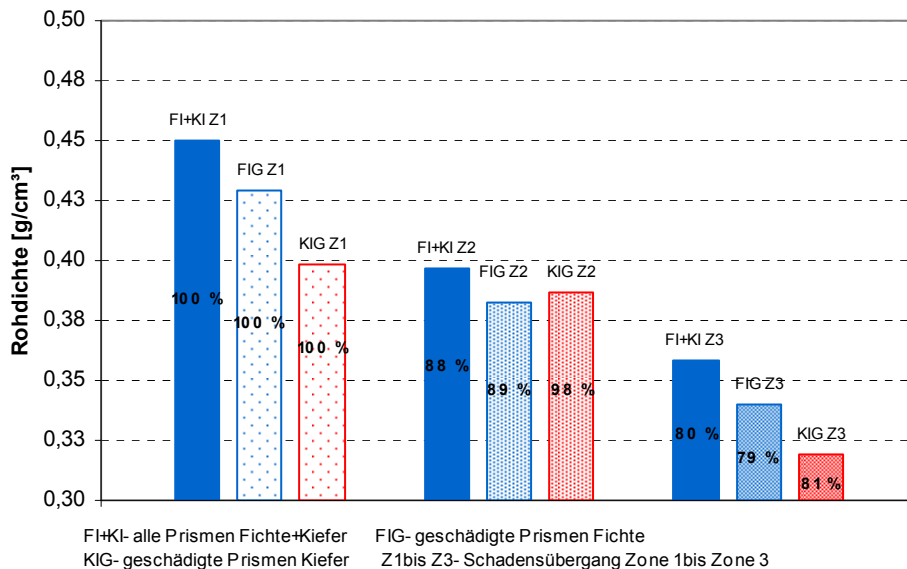


Abb. 86: Rohdichte ($\omega = 12\%$) innerhalb der definierten Schadenszonen der Bohrwiderstandsprismen

Auch der Bohrwiderstand reduzierte sich hin zur Zone 3. Im Vergleich ergab sich ein durchschnittlicher Bohrwiderstand von 50 % im geschädigten Bereich im Vergleich zur Schadenszone 1 (Abb. 87). Die Reduzierung lag damit deutlich unter dem Rohdichteabfall von etwa 80 %. Die Mittelwerte ließen einen nachvollziehbaren Trend erkennen bei dessen Bewertung jedoch auch eine hohe Streuung der Verteilungskennwerte berücksichtigt werden musste.

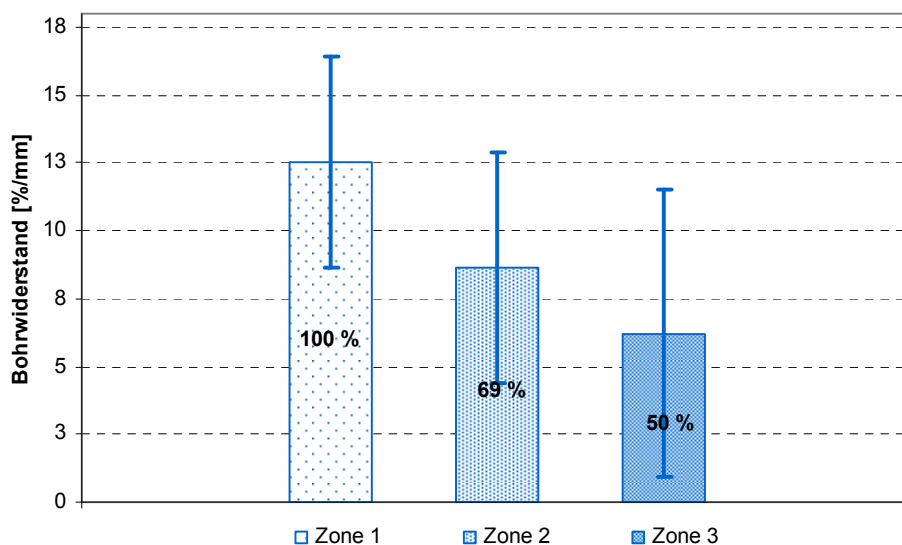


Abb. 87: Bohrwiderstand der Prismen unter Berücksichtigung der Schadenszonen

Obwohl die Rohdichtereduzierung im frühen Befallsstadium kaum merklich ist, sinkt die Festigkeit durch die Zellulosezerstörung sehr stark. In Abb. 88 ist die Abhängigkeit des

Bohrwiderstandes von der Rohdichte dargestellt und bei einem Korrelationskoeffizienten von $r_{xy} = 0,60$ mit den in Kapitel 6.3.2.1.3 ermittelten Ergebnissen vergleichbar.

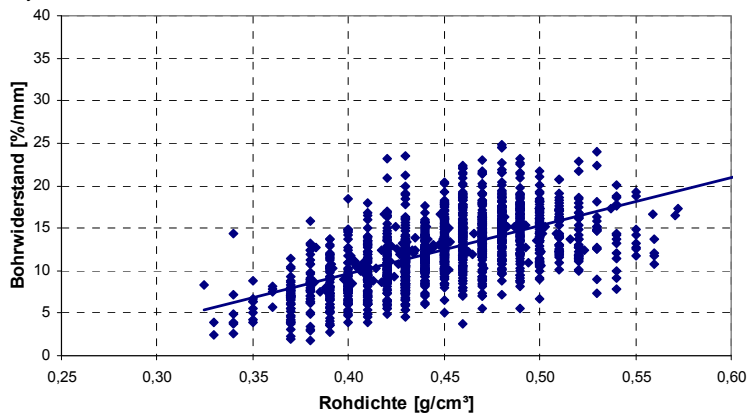


Abb. 88: Zusammenhang zwischen Bohrwiderstand und Rohdichte ($\omega = 12\%$) der Schadenszone 1, $r_{xy} = 0,60$

Der Betrag des Bohrwiderstandes liegt gemäß Abb. 87 zwischen dem der ungeschädigten Zone 1 und der voll geschädigten Zone 3. Die vorliegende Korrelation wird durch die Streuung zwar gedämpft, jedoch kann auch innerhalb des Übergangsbereiches von einem linearen Zusammenhang zwischen Rohdichte und Bohrwiderstand ausgegangen werden (Abb. 89).

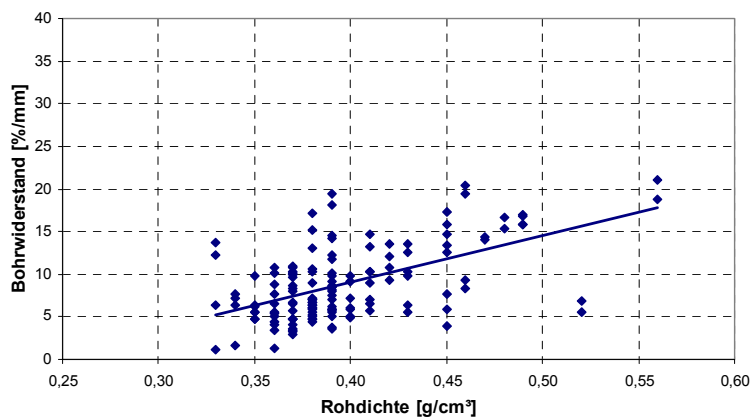


Abb. 89: Zusammenhang zwischen Bohrwiderstand und Rohdichte ($\omega = 12\%$) der Schadenszone 2, $r_{xy} = 0,56$

Für den am stärksten durch Pilzbefall veränderten Bereich der Zone 3 gelten die o. g. Verhältnisse gleichwohl. Die strenge Korrelation bestätigt den deutlichen Struktur- und Substanzverlust.

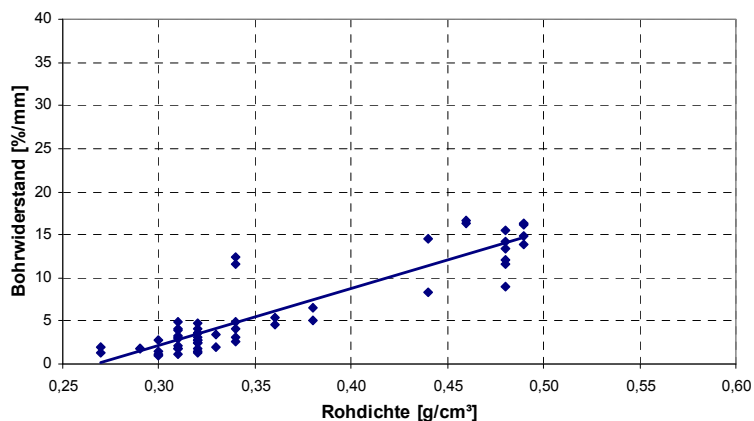


Abb. 90: Zusammenhang zwischen Bohrwiderstand und Rohdichte ($\omega = 12\%$) der Schadenszone 3, $r_{xy} = 0,91$

Tab. 12: Verteilungskennwerte des Bohrwiderstandes der Prüfprismen in Abhängigkeit von der Rohdichte in den Schadenszonen bei $\omega = 12\%$

Zielgröße I_{BW} [%/mm]	Regressionsansatz mit beeinflussender Variable	n [-]	r_{xy} [-]
<u>Schadenszone 1</u>	$I_{BW} = 56,6 \rho_{12} - 13,0$	1.598	0,60
<u>Schadenszone 2</u>	$I_{BW} = 54,6 \rho_{12} - 12,9$	143	0,56
<u>Schadenszone 3</u>	$I_{BW} = 66,0 \rho_{12} - 17,7$	56	0,91

6.3.2.2 Balken

6.3.2.2.1 Kennwerte

Bei der Klimalagerung wurde versucht, schwerpunktmäßig den Bereich von $\omega = 9 - 12\%$ und den Bereich von $\omega = 18 - 25\%$ einzustellen, um die Messergebnisse trockener Balken mit denen an feuchterem, möglichst nahe an der Nutzungsklasse 3 liegendem Holzmaterial zu vergleichen. Der Wert der Ausgleichsfeuchte von $\omega = 25\%$ stellt in Bezug auf den Fasersättigungspunkt die Untergrenze einiger Hölzer dar, so dass hier die Soll-Feuchtigkeitsbegrenzung des Prüfkollektivs sinnvoll erschien.

Nach der Lagerung bei rund 40 % - 95 % relativer Luftfeuchte wurden Prüffeuchtigkeiten zwischen $\omega = 5\%$ und $\omega = 23\%$ erreicht, zu deren Auswertung Feuchtigkeitsklassen gebildet wurden, um eine ausreichende Anzahl der Stichprobe zu erreichen. In Abb. 91 sind die festgelegten Feuchtigkeitsklassen $0\% < \omega \leq 6\%$ bis $21,1\% \leq \omega \leq 24\%$ und die dazu gehörende Verteilung ausgewerteter Messungen dargestellt.

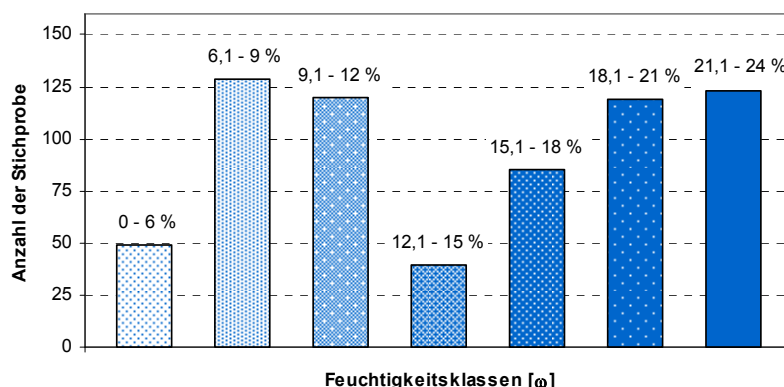


Abb. 91: Anzahl der Bohrwiderstandsmessungen der jeweiligen Feuchtigkeitsklasse

Die Rohdichtekennwerte werden von der Herkunft, also den Wuchsbedingungen innerhalb der Holzarten und natürlich vom Einschnitt bestimmt. Die Zusammensetzung des gesamten Prüfkollektivs war somit entsprechend der durchmischten Herkunft der Probekörper wenig homogen. Die mittlere Rohdichte der ungeschädigten Altholzbalken liegt sowohl für Fichte als auch für Kiefer über der des Neuholzes (Abb. 92) mit geringerer Streuung der ungeschädigten Althölzer. Die Rohdichte der Neuhölzer von Fichte und Kiefer lagen zum Teil unter denen der ungeschädigten Althölzer. Der Mittelwert des Fichte/Tanne-Altholzes liegt dabei nicht über dem des Neuholzes, da die Balken mit der Bezeichnung GTH (Waidhaus Gotha)

eine durchschnittliche Rohdichte von $0,38 \text{ g/cm}^3$ aufwiesen. Bei Betrachtung der ungeschädigten Fichten-Althölzer ausschließlich der Gothaer Balken, ergibt sich ein Mittelwert der Rohdichte von $0,46 \text{ g/cm}^3$. Zusätzlich wurde eine Serie mit Lärchen-Neuholz untersucht. Lärchen-Altholz stand leider nicht zur Verfügung.

Die Neuholzer lagen mit Mittelwerten von $\rho_{12} = 0,43 \text{ g/cm}^3$ für die ungeschädigten Fichtenhölzer (Neu- und Altholz) und $\rho_{12} = 0,46 \text{ g/cm}^3$ bzw. $\rho_{12} = 0,53 \text{ g/cm}^3$ für Kiefer sowie $\rho_{12} = 0,55 \text{ g/cm}^3$ für die Lärche im Bereich der in DIN EN 338 angegebenen Werte ρ_{mean} , die eine Sortierung gemäß DIN 4074-1 voraussetzen und eine individuelle Betrachtung jedes einzelnen Balkens erforderlich machen würde. Insofern decken sich auch für das Fichten-Altholz die Ergebnisse der Balken mit denen der Prismen. Die im Anhang enthaltene Tab. A-9 gibt einen Überblick zu den ermittelten Rohdichten und ausgewählten statistischen Kenngrößen.

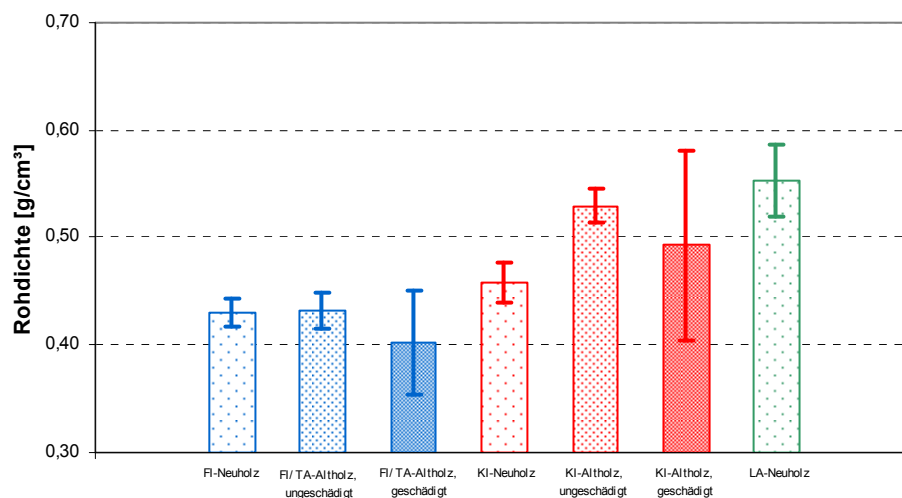


Abb. 92: Rohdichteverteilung ($\omega = 12 \%$) der Prüfkategorien der Balken

6.3.2.2.2 Bohrwiderstand von Neu- und Altholz

Die Bohrwiderstandsmessungen erfolgten an den Balken über die gesamte Querschnittshöhe bzw. -breite. In den randnahen Bereichen vorhandene Risse bedingen den Amplitudenabfall der über die Modifizierung der Auswertungsalgorithmen keinen Eingang in die Berechnung fand. Bei Bohrungen in Randnähe kam es vor, dass durch Verlaufen der Bohrnadel diese seitlich vor Erreichen der gegenüber liegenden Rückwand austrat. Soweit mindestens $3/4$ des Querschnitts durchbohrt wurden, gingen diese in die Auswertung ein. Der verringerte Bohrweg wird durch die Ermittlung des Bohrwiderstandskennwertes je mm egalisiert. Wurden Äste angebohrt, fand eine Anpassung des Bohrweges unter Ausschluss des Astbereiches statt. Wenn die Astbereiche mehr als $1/3$ des gesamten Bohrweges ausmachten oder ein Amplitudensprung nach Verlassen des Astbereiches erkennbar war, wurden die betreffenden Messungen verworfen.

In der Auswertung waren die Bohrwiderstände der Althölzer höher als die der Neuholzer (Abb. 93). Obwohl der Mittelwert der Rohdichte der geschädigten Kiefernholzer deutlich unter dem der Neuholzer lag, sind keine deutlichen Unterschiede zum ungeschädigten Altholz zu finden. Das Kiefernholz besitzt insgesamt höhere Variationskoeffizienten und passt sich damit an die bei den Prismen gefundenen Erkenntnisse an. Der stark variierende

Schädigungsgrad der geschädigten Kiefern-Althölzer bewirkt eine breitere Streuung (Tab. A-10 im Anhang).

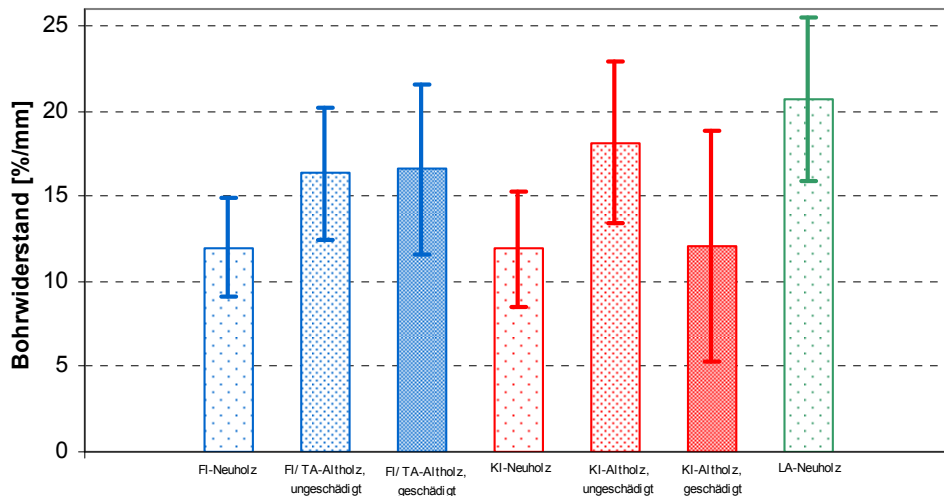


Abb. 93: Bohrwiderstand der Prüfkategorien der Balken

6.3.2.2.3 Rohdichte

In Anlehnung an die Auswertung der prismatischen Prüfkörper wurden zur Einflussermittlung der Rohdichteklassen der Schrittweite $0,02 \text{ g/cm}^3$ bei einer Gesamtspanne von $\rho_{12} = 0,30$ bis $\rho_{12} = 0,63 \text{ g/cm}^3$ gebildet und innerhalb dieser ausgewertet. Zudem wurden die Klassen überlappend mit einer Schrittweite von $0,01 \text{ g/cm}^3$ gebildet, um die Zuordnung noch differenzierter vornehmen zu können und mögliche Pauschalisierungsfehler einer zu groben Rohdichteklassifizierung zu reduzieren. Ausgewertet wurden nur die Kategorien, für die in der jeweiligen Rohdichteklasse mindestens 15 Einzelwerte der Stichprobe zur Verfügung standen.

Im Ergebnis reduzierte sich die Streuung in allen auswertbaren Klassen. Mit der Kombination von Rohdichteklassen wurde beispielsweise ein Variationskoeffizient von 15 % für das ungeschädigte Lärchenholz erreicht (Tab. A-11 im Anhang). In Abb. 94 sind die Variationskoeffizienten dargestellt. Die Werte der Kiefernholzer waren etwas weniger homogen verteilt, als das bei den Fichtenhölzern der Fall war. Aufgrund der Schädigungen muss bei den Althölzern mit einer breiteren Verteilung des Bohrwiderstandes gerechnet werden. Für das Altholz kann insofern eine Begründung geliefert werden, dass die Herkunft der Neuholzer gegenüber dem aus verschiedenen Regionen stammenden Altholz weitaus weniger Variation aufwies.

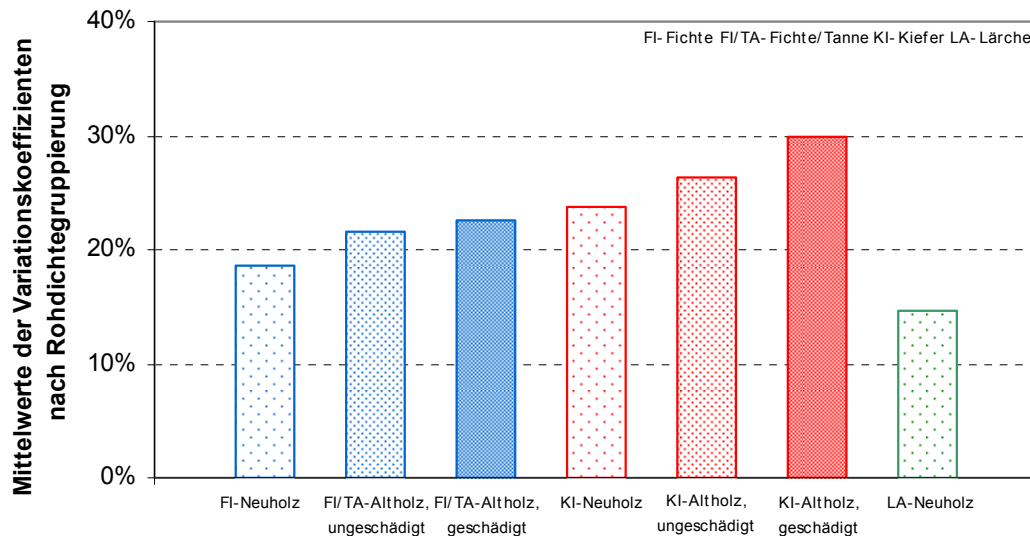


Abb. 94: Übersicht der Variationskoeffizienten des Bohrwiderstandes der Balken nach Rohdichte-gruppierung

Unter Ansatz der Rohdichte der aus den Balken stammenden Einzelpismen und dem Vergleich der jeweiligen Messpunkte mit dem Gesamtquerschnitt wurde der Zusammenhang von Rohdichte und Bohrwiderstand untersucht. Die Einzelwerte der Rohdichte der von der Bohrung betroffenen Prismen wurden gemittelt, um eine weitere Annäherung an die realen Bohrbedingungen herzustellen.

Zwischen Rohdichte und Bohrwiderstand konnte unter der Bedingung einer ausreichenden Rohdichtedifferenz ($\geq 0,025 \text{ g/cm}^3$) ein enger Zusammenhang ermittelt werden, wenn die mittlere Rohdichte aus den Einzelwerten der Rohdichte der Prismen an der durchbohrten Stelle zugrunde gelegt wird. Bei den ungeschädigten Kiefern- und Lärchenhölzern fiel der Zusammenhang insgesamt etwas weniger deutlich aus als bei dem Fichten-Neuholz und dem geschädigten Kiefernholz, bei denen ein Korrelationskoeffizient von $r_{xy} = 0,74$ (Abb. 95) bzw. $r_{xy} = 0,81$ erreicht wurde.

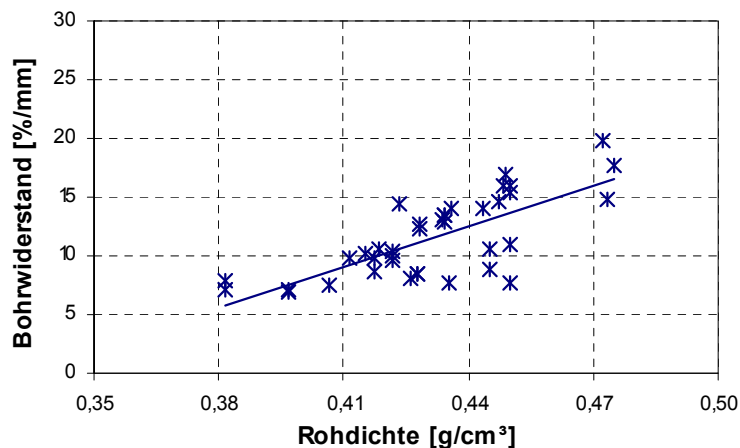


Abb. 95: Zusammenhang von Bohrwiderstand und Rohdichte der Fichten-Neuhölzer, $r_{xy} = 0,74$

Ob sich die verschiedenen Holzarten zusammenführen lassen, wurde untersucht und in Tab. 13 dargestellt. Es flossen zunächst alle Messungen in die Untersuchung des Zusammenhanges ein. Die Abhängigkeit des Bohrwiderstandes von der Rohdichte kann danach als streng eingeschätzt werden.

Die strenge Korrelation von Bohrwiderstand und Rohdichte aller geprüften Hölzer, deren Rohdichtedifferenz $\geq 0,025 \text{ g/cm}^3$ war, ist in Abb. 96 dargestellt.

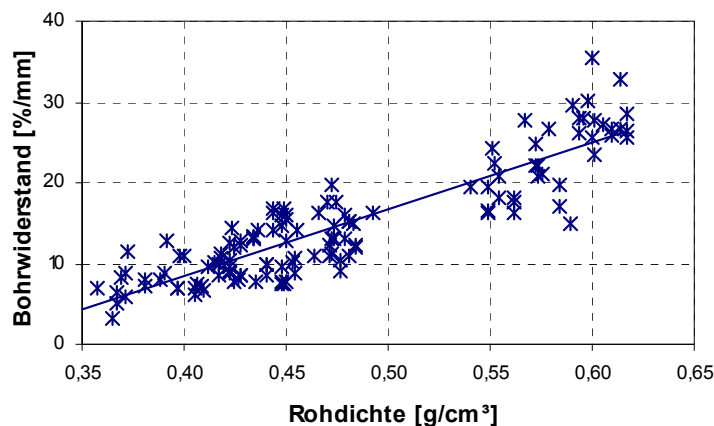


Abb. 96: Zusammenhang von Bohrwiderstand und Rohdichte aller Prüfhölzer mit $\Delta\rho \geq 0,025 \text{ g/cm}^3$, $r_{xy} = 0,90$

Tab. 13: Verteilungskennwerte des Bohrwiderstandes der Prüfbalken in Abhängigkeit von der Rohdichte bei $\omega = 12 \%$, Zusammenfassung von Prüfkategorien

Zielgröße $I_{BW} [\%/mm]$	n [-]	Regressionsansatz mit beeinflussender Variable	r_{xy} [-]
Neuholz Fichte + Kiefer + Lärche	114	$I_{BW} = 87,8 \rho_{12FIN} - 27,4$	0,89
Altholz Fichte + Kiefer, geschädigt und ungeschädigt	80	$I_{BW} = 121,0 \rho_{12KIN} - 36,8$	0,89
alle geprüften Hölzer	194	$I_{BW} = 81,3 \rho_{12KIN} - 22,1$	0,79
alle geprüften Hölzer, wenn $\Delta\rho \geq 0,025 \text{ g/cm}^3$	135	$I_{BW} = 83,0 \rho_{12KIN} - 24,8$	0,90

Die Bohrwiderstandsunterschiede sind bei den geprüften Holzarten und bei gleicher Rohdichte gering genug. Eine mögliche Scheinkorrelation wird durch die oben dargestellten Abhängigkeiten der getrennt betrachteten Holzarten ausgeschlossen.

6.3.2.2.4 Querschnitt

Aus den Untersuchungen in 6.3.2.1 wurde eine Abhängigkeit des Bohrwiderstandes von der Orientierung der Bohrung abgeleitet. Zusätzlich kann nach den vorangegangenen Überlegungen festgestellt werden, dass bei Betrachtung der individuellen Rohdichteverhältnisse an der Stelle der Bohrung sehr strenge Zusammenhänge erwartet werden können. Die individuelle Aufnahme des Rohdichteverlaufes an jeder Bohrstelle ist in der Praxis kaum möglich. Aus diesem Grund wurde nach weiteren Faktoren gesucht, die das Bohrniveau beeinflussen. Über den Balkenquerschnitt durchläuft die Nadel verschiedene Jahrringorientierungen. Der jeweilige Radial- oder Tangentialanteil variiert mit der Lage und Tiefe der Bohrung. Wird die Bohrung direkt in der Achse über der Markröhre angesetzt, sind idealisiert nur Radialanteile vorhanden. Zu den äußeren Balkenbereichen hin steigen die Tangentialanteile an. In diesem Zusammenhang erschien die Betrachtung des Balkens unter einer Querschnittsdifferenzierung erforderlich. Wie in 6.2.2.3 dargestellt, wurde die Querschnittseinteilung als Auswertungsgrundlage genutzt und der zu prüfende Balkenquerschnitt nach vorheriger Abschätzung der auf der Bohrachse befindlichen Jahrringlagen in Abschnitte

eingestuft. Die Querschnittszone 1 ist dabei der radialen Prüfrichtung zugeordnet, symmetrisch anschließend befinden sich die folgenden Zonen, die im äußeren Balkenbereich den größten Tangentialanteil besitzen.

Zunächst fand eine Untersuchung bezüglich der Relevanz der Rohdichte statt, indem die Gesamtrohdichte des Balkens und die Rohdichte der definierten Zonen bestimmt wurden. Die sich ergebenden prozentualen Abweichungen der jeweiligen Querschnittszone von der Gesamtrohdichte sind in Abb. 97 dargestellt. Es lässt sich der Trend ableiten, dass die Rohdichte vom juvenilen Bereich (Zone 1) zum adulten Holz hin (Zone 4) steigt. Dies kann durch den bei Nadelholz zu den äußeren Querschnittszonen hin steigenden Spätholzanteil begründet werden. Der äußere und dichtere Bereich fließt zwar zu Beginn und am Ende der Bohrung in die Betrachtung ein, jedoch findet durch den marknahen Anteil eine Rohdichtereduzierung statt.

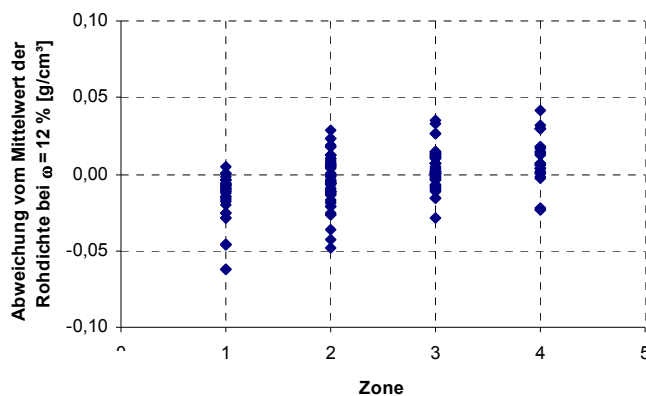


Abb. 97: Vergleich der Abweichung der Rohdichte der Neuhölzer von Fichte, Kiefer und Lärche in den Querschnittszonen von der mittleren Rohdichte des Gesamtbalkens

Es lässt sich prinzipiell feststellen, dass die Tendenz des steigenden Bohrwiderstandes von der Markröhre zu den Balkenrändern hin vorhanden ist (Abb. 98). Für die geschädigten Hölzer ist diese Aussage allerdings pauschal nicht zutreffend, da die Schadensart und der Ort der Schädigung maßgeblichen Einfluss haben.

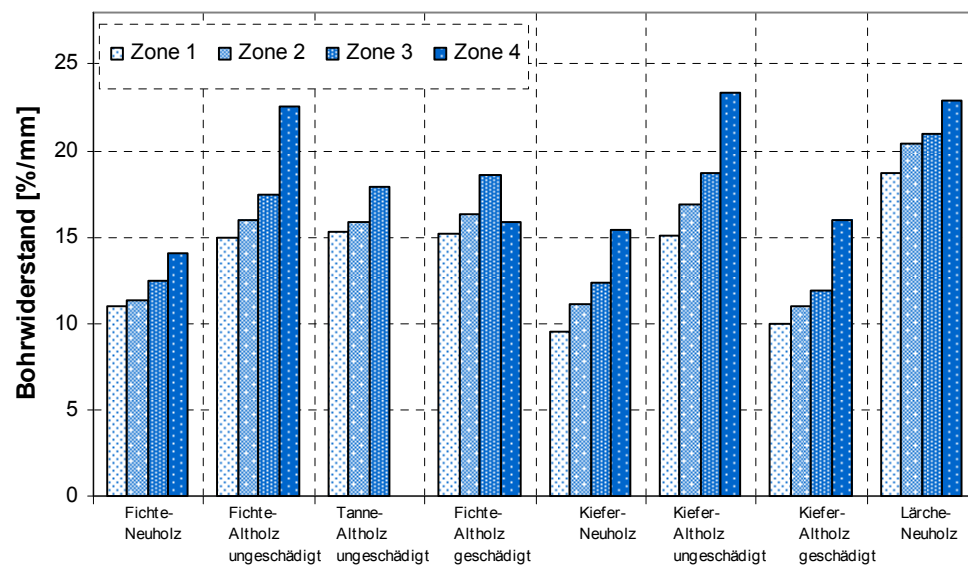


Abb. 98: Bohrwiderstand der Prüfkategorien nach Einteilung des Querschnitts in Zonen

Ähnlich der Vorgehensweise bei den Prismen wurden Rohdichteklassen gebildet und der Bohrwiderstand betrachtet. In Abb. 99 wurden die Variationskoeffizienten der untersuchten Balken vor der Rohdichtegruppierung den ermittelten Werten der jeweiligen Zonierung nach

Gruppierung gegenüber gestellt. Die Verbesserungen des Koeffizienten waren für die Fichten- und Lärchenhölzer und für das geschädigte Kiefernholz besonders deutlich. Die Verbesserung des Variationskoeffizienten des ungeschädigten Kiefernholzes fiel hingegen etwas geringer aus. Mit Hilfe der Gruppierung sind beispielsweise mittlere Verbesserungen von 22 % (Fichten-Altholz) bis 46 % (Kiefer geschädigt) möglich. In Tab. A-12 im Anhang befinden sich die Verteilungskennwerte in Abhängigkeit von den betrachteten Querschnittszonen.

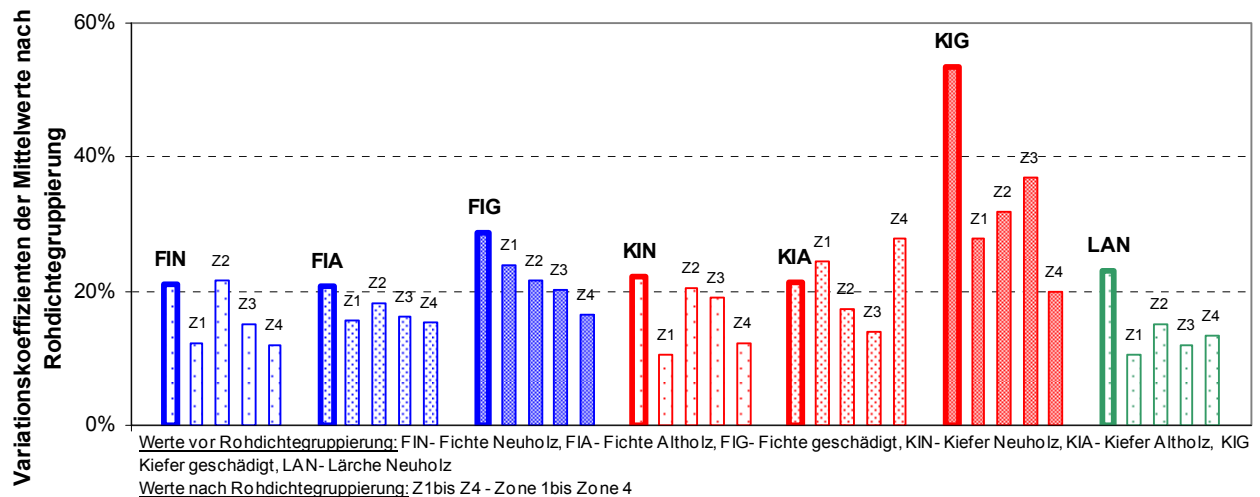


Abb. 99: Übersicht der Variationskoeffizienten der Bohrwiderstandswerte der Balken nach Zonierung vor und nach Rohdichtegruppierung

Wie oben gezeigt, besteht eine Abhängigkeit der Höhe des Bohrwiderstandes von der Stelle der Bohrung und damit von den anatomischen Besonderheiten an diesem Punkt. Es konnte festgestellt werden, dass die Streuungen der Bohrwiderstandswerte in den äußeren Querschnittsbereichen insgesamt etwas geringer und radiale Bohrungen aussagekräftiger waren.

In den Fällen, wo der geprüfte Querschnitt komplett zu Prismen aufgetrennt wurde, ließ sich ein individuelles Rohdichteprofil aus den aneinander gereihten und im Anschluss gemittelten Einzelrohndichten erstellen. Diese gemittelte Rohdichte diente als Basis, um die Bohrwiderstandsintegrale über diese aufzutragen. Im Ergebnis bestimmte der jeweilige Variationskoeffizient die Tendenz der Darstellung und die Abgrenzung der inneren juvenilen von den äußeren adulten Bereichen. In Abb. 100 bis Abb. 102 wurde die Rohdichte- mit der Bohrwiderstandsverteilung über den Querschnitt eines Fichtenbalkens verglichen und mit den Querschnittszonen dargestellt.

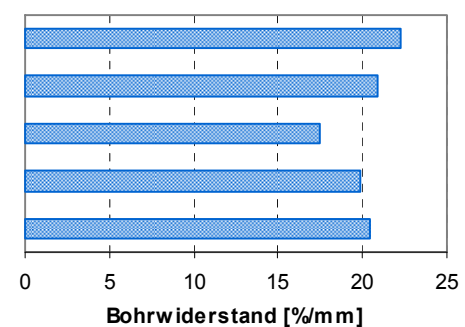
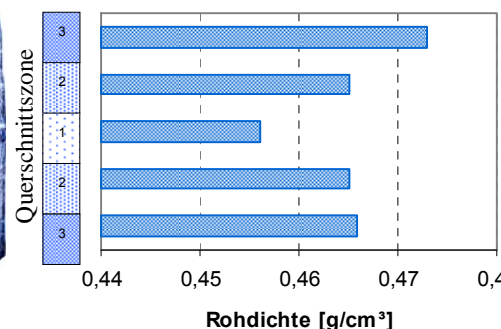


Abb. 100: Querschnitt eines Fichtenbalkens

Abb. 101: Rohdichteverteilung ($\omega = 12\%$) über den Querschnitt

Abb. 102: Bohrwiderstandsverteilung über den Querschnitt

6.3.2.2.5 Feuchtigkeit

Einige der Balken wurden zweimaliger Klimalagerung ausgesetzt und jeweils der Bohrwiderstand ermittelt. Dabei wurde möglichst nahe an der ursprünglichen Prüfstelle gebohrt, um den anatomisch bedingten Einfluss auf das Prüfergebn zu reduzieren. Da es sich um dieselben Balken und um nahezu gleiche Stellen handelte, konnte die Rohdichte bei einem Vergleich der Änderung der Bohrwiderstände vernachlässigt werden.

Die Untersuchung der Bohrwiderstände der übrigen Balken und der Vergleich untereinander wurden innerhalb einer Rohdichteklasse vorgenommen. Abb. 103 zeigt die Verteilung der Bohrwiderstandswerte der Rohdichteklasse 0,46 bis 0,48 g/cm³.

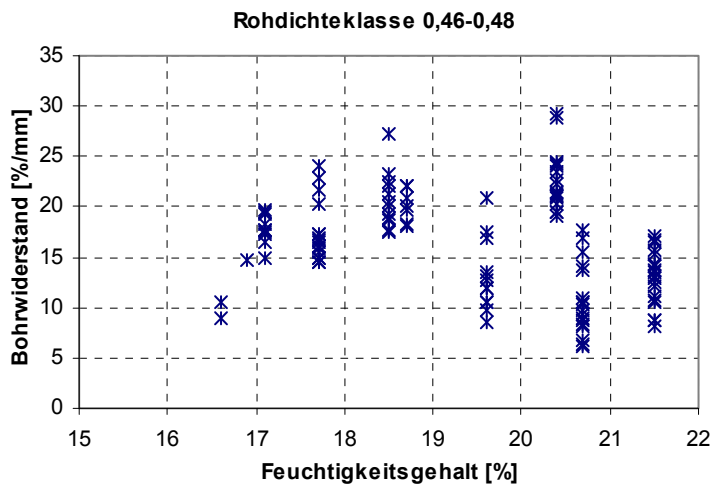


Abb. 103: Bohrwiderstand und Feuchtegehalt innerhalb der Rohdichteklasse von 0,46 bis 0,48 g/cm³

Nach erfolgter Regressionsanalyse konnte im Ergebnis aus den 138 Datensätzen kein Zusammenhang zwischen Feuchtegehalt und Bohrwiderstand abgelesen werden. Weder eine weitere Eingrenzung der Rohdichtespanne noch eine Ausweitung und damit eine weniger differenzierte Betrachtung ließen einen Zusammenhang erkennen.

Dieses Ergebnis steht zunächst im Widerspruch zu der oft zitierten Aussage, dass der Bohrwiderstand mit steigendem Feuchtegehalt steigt. Dabei muss beachtet werden, dass in [Eckstein und Saß, 1994] der Bohrwiderstand bei einer Holzfeuchte von $\omega = 10\%$ mit dem bei $\omega \approx 60 - 100\%$ verglichen wurde und ausschließlich Laubhölzer zur Prüfung kamen. Nach den hier durchgeführten Untersuchungen gibt es keine signifikanten Änderungen des Bohrwiderstandes der Nadelhölzer innerhalb der Spanne von rund $16,5\% \leq \omega \leq 21,5\%$.

6.3.2.2.6 Bohrtrend

Zur Beschreibung des Bohrtrends wurden die Neuholzbalken von den jeweils gegenüber liegenden Seiten durchbohrt. Die Rückbohrung wurde vorzugsweise in unmittelbarer Nähe der Hinbohrung durchgeführt. Der Abstand musste jedoch ausreichend groß gewählt werden, um im Falle des Verlaufs der Nadel eine Beeinflussung des vorhandenen Bohrloches auszuschließen. Der Versatz der Rückbohrung wurde mit minimal 2,5 cm gemäß dem vorhandenen Raster realisiert.

Die Bohrungen, bei denen ein Ast durchbohrt wurde und der Bohrwiderstand nach Durchbohren des Astes ein höheres Niveau erreichte, wurden verworfen (siehe auch 5.2.2.5).

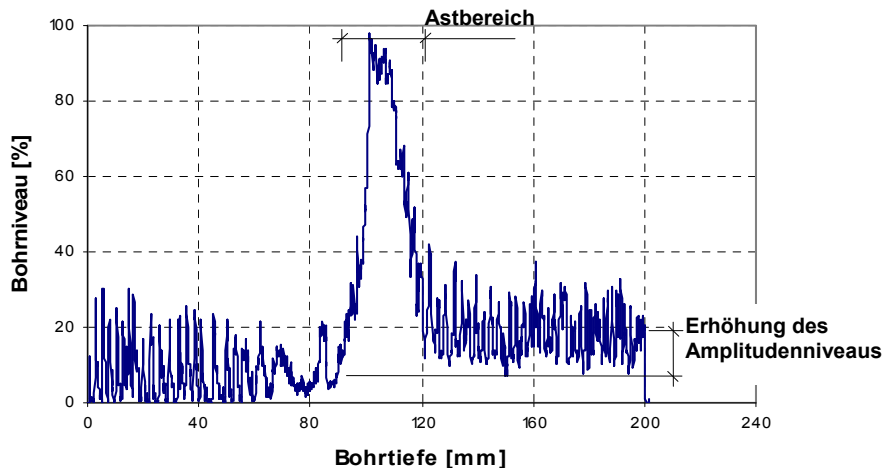


Abb. 104: Bohrkurve mit Amplitudenerhöhung nach Durchbohren eines Astbereiches

Bei Beschreibung des Bohrverlaufs über eine Ausgleichsgerade wird bei Erwartung eines Bohrtrends der Anstieg der Gerade $y = a + bx$ beschrieben. Ein Bohrtrend liegt bei fehlendem Anstieg mit $b = 0$ der Hin- oder der Rückbohrung nicht vor. Demnach liegt ein verfahrensbedingter Bohrtrend dann vor, wenn

- ein positiver Anstieg der Ausgleichsgeraden der Hinbohrung zu verzeichnen ist und die Rückbohrung einen positiven Anstieg besitzt,

anatomisch bedingter Bohrtrend dann vor, wenn

- ein positiver Anstieg der Ausgleichsgeraden der Hinbohrung zu verzeichnen ist und die Rückbohrung einen negativen Anstieg besitzt oder
- ein negativer Anstieg der Ausgleichsgeraden der Hinbohrung zu verzeichnen ist und die Rückbohrung einen positiven Anstieg besitzt.

Nach Gegenüberstellung und Auswertung der Messungen innerhalb der Querschnittszonen wurde festgestellt, dass ein verfahrensbedingter Bohrtrend vorhanden ist, dieser jedoch teilweise oder ganz von anatomischen Bedingungen des geprüften Nadelholzes verwischt oder ausgelöscht wird. Insgesamt überwiegt ein positiver Anstieg, der jedoch nicht immer bei den beiden zugehörigen Bohrungen dargestellt werden konnte (Abb. 105).

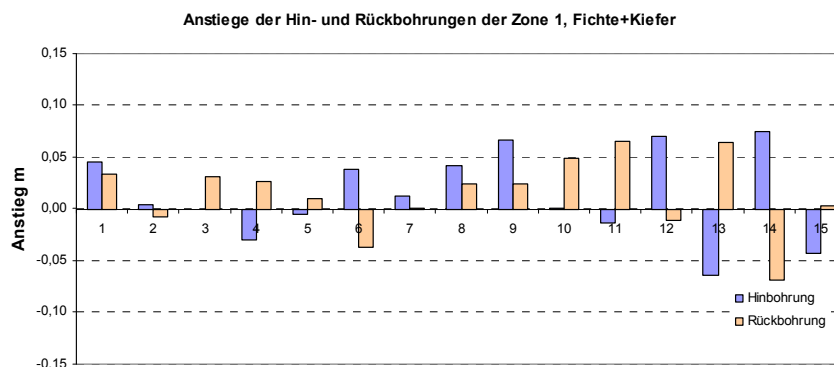


Abb. 105: Gegenüberstellung der Anstiege der Hin- und Rückbohrungen der Fichten- und Kiefernholzer der Zone 1

Deutlicher wird ein verfahrensbedingter Bohrtrend bei dem geprüften Lärchenholz. Beispielhaft ist in Abb. 106 die Gegenüberstellung der Prüfungen der Zone 2 dargestellt. Der verfahrensbedingte Bohrtrend überwiegt hierbei und ist recht deutlich ausgeprägt. Jedoch spielten auch hier anatomische Besonderheiten eine Rolle, die im Falle des Datenpaares 10, aber auch bei anderen Messungen bei Fichte und Kiefer sogar zur Vorzeichenumkehr führten.

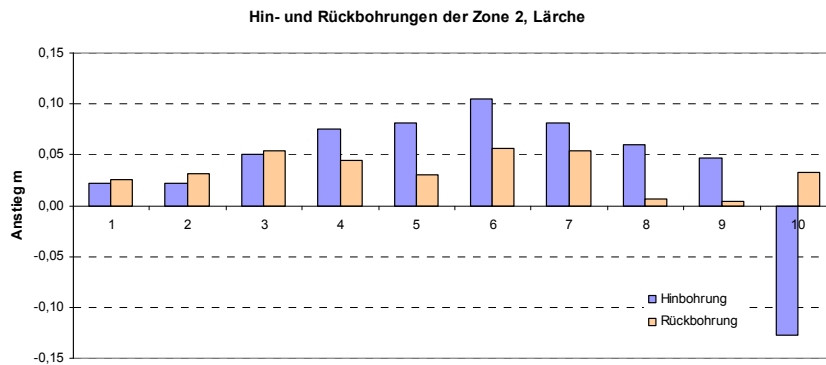


Abb. 106: Gegenüberstellung der Anstiege der Hin- und Rückbohrungen der Lärchenhölzer der Zone 2

Für die Querschnittszonen 1, 3 und 4 war das Verhältnis zwischen verfahrens- und anatomisch bedingtem Bohrtrend etwa ausgeglichen. In der Querschnittszone 2 überwog der verfahrensbedingte Bohrtrend mit rund 57 %, was maßgeblich durch das geprüfte Lärchenholz bestimmt wurde. Für alle geprüften Hölzer betrug der Anteil des verfahrensbedingten Bohrtrends 51 % und der des anatomisch bedingten Bohrtrends 49 % und hält sich damit die Waage.

Die Überdeckung des Bohrtrends findet offenbar durch die große Bohrlänge und den Wechsel der physikalisch-mechanischen Eigenschaften entlang des Bohrweges recht häufig statt.

Es konnte der Trend des zunehmenden verfahrensbedingten Anteils mit steigender Rohdichte ermittelt werden. Dieser wird anhand der Lärche mit einem Anteil von insgesamt 71,4 % bei $\rho_{12} = 0,56 \text{ g/cm}^3$ und der Fichte von 36,0 % bei $\rho_{12} = 0,43 \text{ g/cm}^3$ deutlich. Die Kiefer liegt mit 42,9 % und $\rho_{12} = 0,46 \text{ g/cm}^3$ zwischen den beiden Holzarten. Bei weichen und wenig dichten Hölzern macht sich der Bohrtrend weniger bemerkbar, da weniger Energie erforderlich ist, die Späne um den Bohrnadelschaft zu platzieren und zu komprimieren. Der ermittelte verfahrensbedingte Bohrtrend wurde zudem hinsichtlich des Bohrwegeinflusses untersucht. Die Neuholzbalken hatten Kantenlängen von rund 150 bzw. 200 mm. Ein Vergleich des Bohrtrends innerhalb dieser ergab keine markante Abhängigkeit bei den 80 Bohrungen (40 Datenpaare) der Lärche, die die größte Verfahrensabhängigkeit aufwies. Die Auswertung der Prismen ergab ebenso keine ableitbaren Zusammenhänge. Die ermittelten Steigungen von 186 Bohrungen waren mit positiven und negativen Vorzeichen zu finden. Auch die Differenzierung nach radialer, tangentialer und tangential/radialer Bohrrichtung ergab keine markanten Abhängigkeiten.

6.3.2.2.7 Verlaufen

Das Abdriften der Nadel und damit die Abweichung vom ideal linearen Bohrweg waren in einigen Fällen anhand der Bohrkurve und nach Auftrennen der Balken an den betreffenden Querschnittsbereichen festzustellen (Abb. 107).

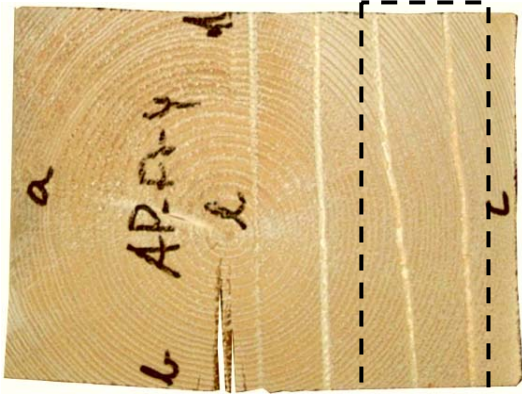


Abb. 107: Verlaufen der Bohrnadel durch tangentialen Bohrverlauf

Das Verlaufen steht nach den hier durchgeführten Untersuchungen am Nadelholz im Zusammenhang mit dem schrägen Auftreffen der Nadel auf Spätholzbereiche und dem Abgleiten in tangentialer Richtung. Nach Auslenkung der Nadel tritt diese bei zunehmendem Widerstand gegen die Verformung wieder in den Spätholzbereich ein und das Bohrbild gleicht sich der typischen radialen oder tangential/radialen Bohrkurve an.

Ein Verlaufen der Nadel ist dann wahrscheinlich, wenn der Winkel α_{BW} zwischen Tangente des Jahrringes und auftreffender Achse der Bohrung ausreichend klein ist (Abb. 108), da auf der Seite des Nadelkopfes, auf der sich das weichere Frühholz befindet, ein besserer Spanabhub möglich ist und die Bohrrichtung dem Spätholz ausweicht. Bei sehr flachem, sich tangential annäherndem Winkel ist ein Umlaufen entlang des Spätholzes möglich, bis die Steifigkeit der Nadel den Nadelkopf wieder von der Tangentialrichtung drängt.

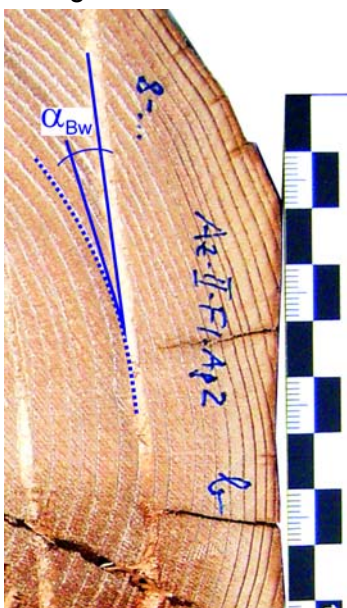


Abb. 108: Darstellung des Winkels α_{BW} zwischen Bohrrichtung und Jahrringtangente

Der Winkel ist jedoch nicht allein Auslöser für das Verlaufen. Es besteht zusätzlich eine Abhängigkeit von der Jahrringbreite. Je schmaler der Jahrring ist, desto kleiner muss der Winkel α_{BW} sein, der zum Verlaufen führt. Ein breiter Jahrring bewirkt, dass α_{BW} im Vergleich

dazu größer sein kann. Weiterhin ist der Wechsel bzw. Übergang vom Früh- zum Spätholz von Einfluss, denn je stärker zudem die Rohdichtedifferenz zwischen Früh- und Spätholz ist, desto größer kann der Winkel sein. Somit ergeben sich für verschiedene Hölzer und insbesondere unterschiedliche Holzarten abweichende Verlaufskriterien.

Die Bedingungen für das Verlaufen der Bohrnadel wurden gemäß Tab. 14 unter Berücksichtigung des Auftreffwinkels und der Jahrringbreite charakterisiert. Die in der Tabelle angegebenen Werte wurden aus entsprechenden Profilen ermittelt. Die Winkelangaben α_{BW} und zugehörigen Jahrringbreiten sind die, bei denen das Verlaufen eingetreten ist. Die Grenzwerte der Winkel für die angegebenen Jahrringbreiten liegen sehr wahrscheinlich etwas höher.

Tab. 14: Kriterien des Verlaufs der Bohrnadel

α_{BW}	Jahrringbreite
Fichte	
$< 8^\circ$	1,7 mm
$< 10^\circ$	2,3 mm
Kiefer	
$< 12^\circ$	2,6 mm
Lärche	
$< 18^\circ$	2,5 mm

Der Abfall des Bohrwiderstandes nach dem Wechsel vom tangential/radial zum tangential durchbohrten Verlaufs Bereich ist bei längeren Verlaufs Bereichen mit einem potenziellen Schadensbereich vergleichbar (Abb. 109), so dass bei unzureichender Kenntnis des Verfahrens eine Verwechslung nicht ausgeschlossen ist, insbesondere wenn zusätzlich Fehlstellen (Risse) hinzukommen. Wie bei allen Prüfverfahren bestimmt die kritische Auswertung der Daten die Qualität der Untersuchung.

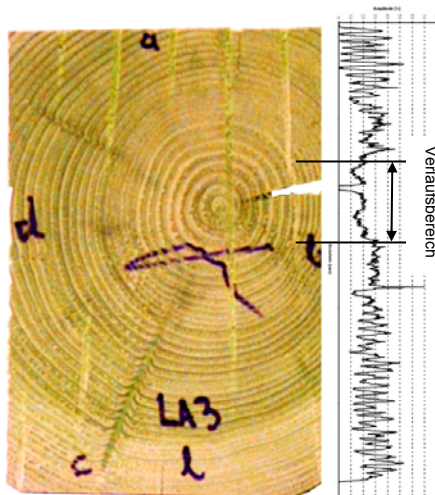


Abb. 109: Bohrkurve mit Markierung des Verlaufs Bereiches

Trifft die Nadel Hohlräume bzw. Risse, nimmt die Führung durch den mehr oder weniger als eingespannt einzustufenden Schaft mit der Entfernung von der Austrittsstelle zu und die Nadel schwingt auf einer kreisförmigen Bahn um ihre feststehende Achse. Der Wiedereintritt der Nadel in das Material erfolgt dann auf dem nächstliegenden Punkt auf dem beschriebenen Kreis, so dass zwangsläufig eine Abweichung und damit das Verlaufen eintreten. Der durchbohrte Weg sollte daher nachvollzogen werden. Unter praktischen Bedingungen vor Ort ist das allerdings nicht immer möglich.

Bei vergleichsweise großen Rohdichtesprüngen ist durch eine höhere erforderliche Schnittleistung eine Stauchung der Nadel denkbar. Ein Aufbauchen der Nadel, die Induktion einer Unwucht und eine höhere Reibung der verformten Nadel mit den Bohrspänen an der Bohrkanalwandung können zum Verlaufen der Nadel beitragen.

6.3.2.2.8 Schadensübergangsbereich

Anhand ausgewählter geschädigter Nadelholzbalken wurden die Übergangsbereiche vom gesunden, intakten Balkenabschnitt zum geschädigten hin geprüft. Im Folgenden wird die Untersuchung an einem Probekörper dargestellt. Die Ergebnisse eines weiteren geschädigten Balkenabschnittes wurden dem Anhang beigelegt. Der geprüfte Balken ist in Abb. 110 mit der Markierung des verdichteten Rasters dargestellt, wobei hier die der Schädigung gegenüber liegende Seite, von der aus gebohrt wurde, zu sehen ist. Das dichte Punktraster ist der als Übergangszone definierte und untersuchte Bereich. Innerhalb des Rasters wurde an etwa jedem zweiten Rasterpunkt einer Spalte gebohrt, jeweils um eine Zeile versetzt mit einer Spalte Zwischenraum.

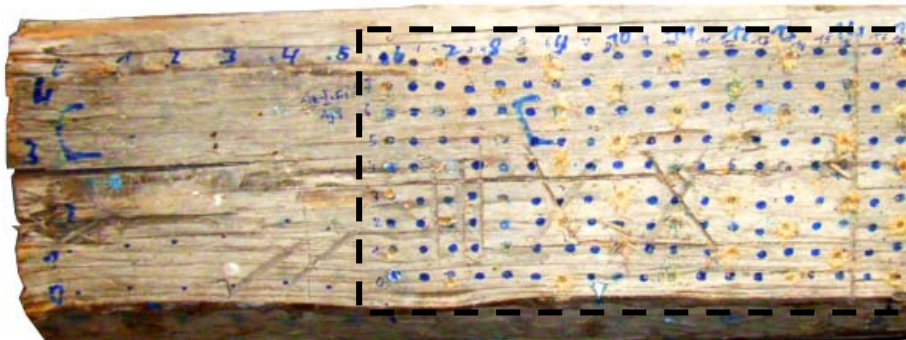


Abb. 110: Probekörper 1 mit Markierung des Rasters der Übergangszone, ungeschädigte Oberseite

Nach Aufnahme, Konvertierung und Auswertung der Daten wurde nach einer Möglichkeit gesucht, die Ergebnisse in allgemein gut nachvollziehbarer Form darzustellen. In der üblichen Praxis wird die Methode bei verdeckten Schäden angewandt. Die Bohrung erfolgt also von der intakt erscheinenden Oberfläche aus. Eine einfach verständliche Reproduktion der Ergebnisse liefert eine Kartierung der Ergebnisse in gleicher Blickrichtung. Dafür werden Wertebereiche der Bohrwiderstandskennwerte gebildet. Nach variierender farblicher Codierung deuten helle Töne auf einen intakten Bereich. Auf dieser Basis kann bei Ausbleiben hoher Messwerte eine potenzielle Schädigung angenommen werden. Die Auswertung muss natürlich unter Berücksichtigung der beprobten Rasterpunkte erfolgen, um das Fehlen von Daten nicht mit einer potenziellen Schädigung gleichzusetzen. Die Auswertung basiert auf dem hier definierten Bohrwiderstandskennwert und ist damit unabhängig von der Bohrtiefe (Abb. 111).

Zunächst wurden die am stärksten geschädigten Bereiche der Schadenszone 3 nach Abb. 111 kenntlich gemacht. Dabei wurden die Bohrwiderstandswerte farblich codiert dargestellt. Ein geringer Bohrwiderstand (unterhalb eines definierten Schwellenwertes) erscheint danach dunkler als die Bohrwiderstandswerte oberhalb des Schwellenwertes. Nach Modifizierung des Auswertalgorithmus wurden die Daten der Zone 2, also der Zone zwischen den stark und den optisch intakt erscheinenden Holzpartien (Abb. 112) ausgewertet.

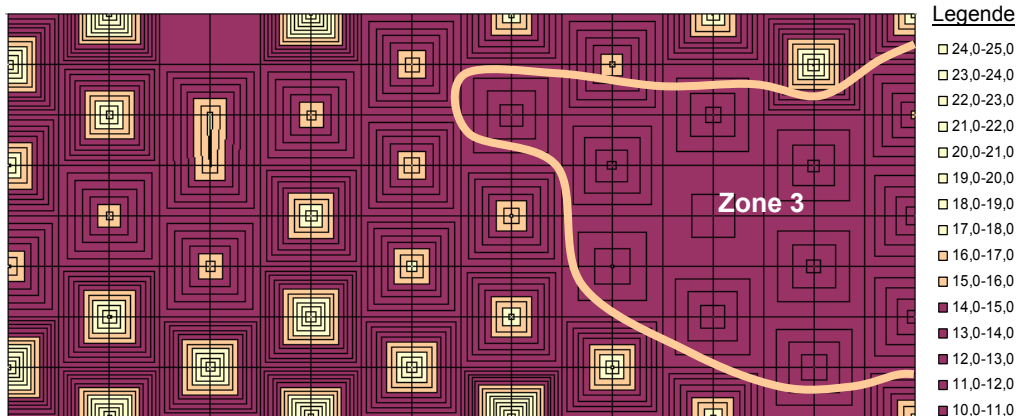


Abb. 111: Messwertdarstellung des Prüfkörpers 1 (Bohrwiderstandsintegral) mit Markierung der potenziellen Schadenszone 3

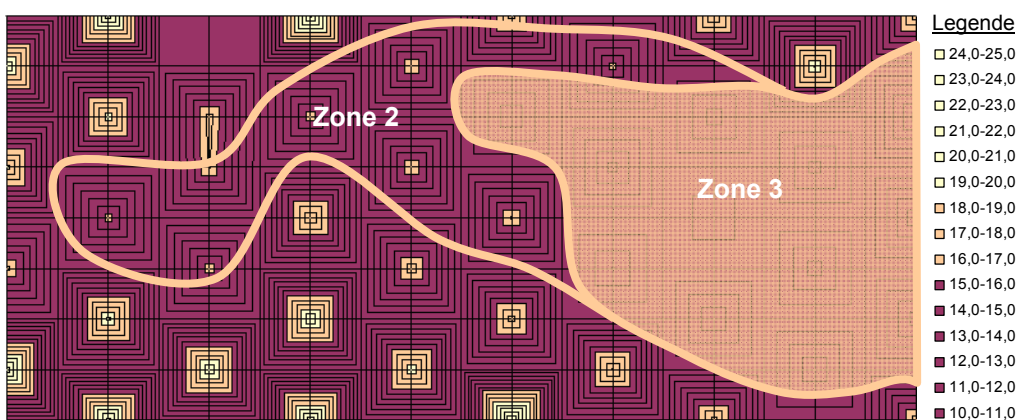


Abb. 112: Messwertdarstellung des Prüfkörpers 1 (Bohrwiderstandsintegral) mit Markierung der potenziellen Schadenszone 2

Bei Vergleich der Messergebnisse (Abb. 111 und Abb. 112) mit dem realen Querschnitt (Abb. 113), deckt sich die Schadenszone 3 annähernd mit den sichtbar am stärksten geschädigten Bereichen des geprüften Balkens. Es existieren Abweichungen von der mit bloßem Auge erkennbaren und den sich aus dem Messergebnis ergebenden Schäden. Nicht detektiert wurde ein sich im oberen Teil der Abb. 113 befindlicher Bereich. Die Begründung liegt darin, dass es nach Sichtung der Bohr widerstandsprofile keinen allmählichen oder deutlichen Abfall der Bohramplitude an dieser Stelle gab, der eine über den Querschnitt vorzunehmende Abstufung erlaubt hätte.



Abb. 113: Probekörper 1 der Untersuchung der Übergangszone (geschädigte Unterseite)

Nach den Messergebnissen gibt es einen Schadensbereich 3 im unteren Teil der Abb. 113, der sich mit einem dort befindlichen Riss deckt, an dessen Flanken offenbar eine Schädigung im Balkeninneren vorliegt. Das wurde durch Aufschneiden des Probekörpers untersucht und eine weiterführende, verdeckte Schädigung bestätigt. Ebenso verläuft die in Abb. 112 detektierte Zone 2 entlang eines Risses und auch hier bestätigt sich eine von dem Riss ausgehende, wenn auch geringere und nur durch leichte Verdunklung der umliegenden Holzpartien feststellbare Holzerstörung.



Abb. 114: Holzschädigung um die Risse gegenüber der beprobten Seite (Markierung rechts) deutlich im Inneren des Querschnitts durch Verfärbung zu erkennen

Die Applikation der Bohrwiderstandswerte auf die chemische Zusammensetzung des Holzes im Schadensübergangsbereich (siehe Anhang Abschnitt A 4.4) ist im Zusammenhang mit der Veränderung der Rohdichte zu bewerten. Mit zunehmender Braunfäuleschädigung reduziert sich der Anteil an Zellulose, die Anteile der Hemizellulosen und des Lignins steigen. Damit reduziert sich die Rohdichte deutlich. Die Abnahme der Rohdichte hat entscheidenden Einfluss auf die Minderung des Bohrwiderstands.

6.3.3 Zusammenfassung der Ergebnisse der Bohrwiderstandsmessungen

Nach den durchgeführten Untersuchungen können charakteristische Merkmale für die jeweiligen Bohrrichtungen aus den Prismenprüfungen abgeleitet werden. Das sind für einen

- **radialen** Bohrverlauf
 - deutliche Amplitudenschwankungen bei insgesamt aber gleichmäßigem Niveau,
 - sehr starke Amplitudenschwankungen bis 100 % und
 - linksschiefe Peaks bei Bohrung von der rechten Seite;
- **tangentialen** Bohrverlauf
 - wesentlich geringere Amplitudenschwankungen bei wechselhaftem Niveau,
 - Amplitudenschwankung von etwa 30 % bis 40 % und
 - niedriger Bohrwiderstand über die durchbohrten Frühholzbereiche, eher allmählicher Anstieg bei Wechsel zum durchbohrten Spätholzbereich;
- **tangential/radialen** Bohrverlauf
 - mittlere Amplitudenschwankungen in Abhängigkeit der Jahrringbreite bei gleichmäßigem Niveau und
 - Amplitudenschwankung je nach individueller Jahrringlage von etwa 30 % bis 80 %.

Für die ungeschädigten Nadelholzprismen wurde der größte Bohrwiderstand in der Bohrrichtung tangential/radial ermittelt, der bei den Prismen in deutlicher Korrelation zur Rohdichte steht. Mit steigender Rohdichte erhöht sich der Bohrwiderstand.

Die **Ausgleichsfeuchte** der klimatisiert gelagerten Prismen lag für die ungeschädigten Althölzer um $\omega = 0,4 \%$ für die Fichte und $\omega = 2,4 \%$ für die Kiefer unter denen der Neuhölzer.

Ein Einfluss des **Feuchtegehaltes** auf den Bohrwiderstand konnte im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen an den Prismen für eine Feuchtigkeitsspanne von $9 \% \leq \omega \leq 12 \%$ nicht nachgewiesen werden. Auch bei den Balken war für eine Feuchtigkeitsspanne von $16,5 \% \leq \omega \leq 21,5 \%$ ein Einfluss auf die Höhe des Bohrwiderstandes nicht feststellbar.

Der Bohrwiderstand steigt mit zunehmender **Rohdichte**. Auch für die geschädigten Hölzer der Schadenszone 3 konnte ein strenger Zusammenhang ermittelt werden.

Die Ergebnisse der Untersuchungen an den Prismen konnten zielgemäß für die Vorgehensweise bei der Auswertung der Balkendaten genutzt werden. Bei der Bohrwiderstandsprüfung der Balken bestätigten sich die an den Prismen gewonnenen Erkenntnisse, dass eine Korrelation zur Rohdichte auch bei den geschädigten Balken besteht.

Die zur weiteren Annäherung gebildeten **Querschnittszonen** führten zur Verringerung der Streuung der Bohrwiderstandswerte.

Ohne eine besondere Prüfserie definiert zu haben, wurde in Bezug auf **Äste** festgestellt, dass

- das Durchbohren von Punkstäben bereits zum Anstieg des Bohrwiderstandes führt und damit die in der Literatur angegebenen Durchmesser ab 20 mm als zu hoch angesetzt bewertet werden,
- bei Bezug der Asterkennung auf die Gesamtmessung (Erhöhung des Bohrniveaus), eine Abhängigkeit vom Bohrweg zu definieren ist und nicht pauschal angegeben werden kann und
- das Durchbohren eines Astes auch nach Verlassen des Astbereiches zu einem permanenten Anstieg und damit zur Verfälschung des Bohrwiderstandes führen kann.

Der verfahrensbedingte **Bohrtrend** ist umso deutlicher bei dichteren Hölzern vorhanden und wird teilweise oder ganz von anatomischen Bedingungen des geprüften Nadelholzes verwischt oder ausgelöscht.

Ein **Verlaufen** der Bohrnadel ist dann umso wahrscheinlicher, wenn

- der Winkel α_{BW} zwischen Bohrrichtung und Jahrringtangente klein ist (z. B. 8° bei Fichte mit einer Jahrringbreite von 1,7 mm)
- die Jahrringbreite groß ist und
- der Übergang von Früh- zum Spätholz abrupt erfolgt.

Die Unterscheidung eines **Schadensübergangsbereiches** von gesundem zu geschädigtem Holz ist bei Ansatz eines ausreichend feinmaschigen Prüfrasters möglich. Zudem konnte festgestellt werden, dass mit fortschreitendem Befall scharfe Abgrenzungen der Jahrringe und damit feine Dichteunterschiede nicht mehr ablesbar sind.

6.4 Druckprüfungen

6.4.1 Methodik

Aus den Neu- und Altholzbalken wurden Prismen für die Prüfung der Druckfestigkeit hergestellt. Die durchgeführten Druckprüfungen entsprachen den Vorgaben nach DIN 52185. Die Probenabmessungen betrugen $2,0 \times 2,0 \times 5,0$ [cm] bzw. bei einigen Proben $3,0 \times 3,0 \times 5,5$ [cm]. Zum Einsatz kamen die Prüfeinrichtungen TONICOMP III (Abb. 115) bzw. TIRAtest 24100 mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 200 - 500 N/s in Abhängigkeit von der vorher geprüften und abgeschätzten Prüfdauer von 90 Sekunden (± 30 Sekunden).



Abb. 115: Prüfmaschine TONICOMP am F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde

Die Berechnung der Druckfestigkeit ist der Formelzusammenstellung im Anhang zu entnehmen. Wie auf alle Festigkeitskenngrößen hat der Feuchtegehalt auch bei der Druckbeanspruchung von Holz einen erheblichen Einfluss. Daher wurde für jeden Prüfkörper nach Erreichen der Bruchspannung der Feuchtegehalt mittels Darrtrocknung bei $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ bestimmt.

6.4.2 Messergebnisse und Auswertung

6.4.2.1 Kennwerte

Die Ausgleichsfeuchtigkeit wurde gemäß DIN 52183 mit dem Ergebnis bestimmt, dass es zum Teil erhebliche Schwankungen bei gleichen Lagerungsbedingungen durch individuellen Wuchs oder auch durch eingelagerte Inhaltsstoffe gibt. Der Feuchtegehalt der geschädigten Proben lag tendenziell unter denen der ungeschädigten Neu- und Althölzer (siehe Anhang). Die ungeschädigten Fichten-Althölzer hatten eine um $\omega = 0,3 \%$, die ungeschädigten Kiefern-Althölzer eine um $\omega = 1,4 \%$ geringere Ausgleichsfeuchtigkeit als die Neuhölzer.

Bei Abweichungen des Feuchtegehaltes von $\omega = 12 \%$ wurden die resultierenden Rohdichtewerte auf 12 % Bezugsfeuchte normiert.

Die ungeschädigten Althölzer wiesen eine höhere Rohdichte auf als die Neuhölzer und die Prüfprismen der geschädigten Balken lagen bezüglich ihrer Rohdichte deutlich unter den ungeschädigten Neu- und Althölzern. Dieses Ergebnis bestätigt die unter 6.3.2.1 gewonnenen Erkenntnisse.

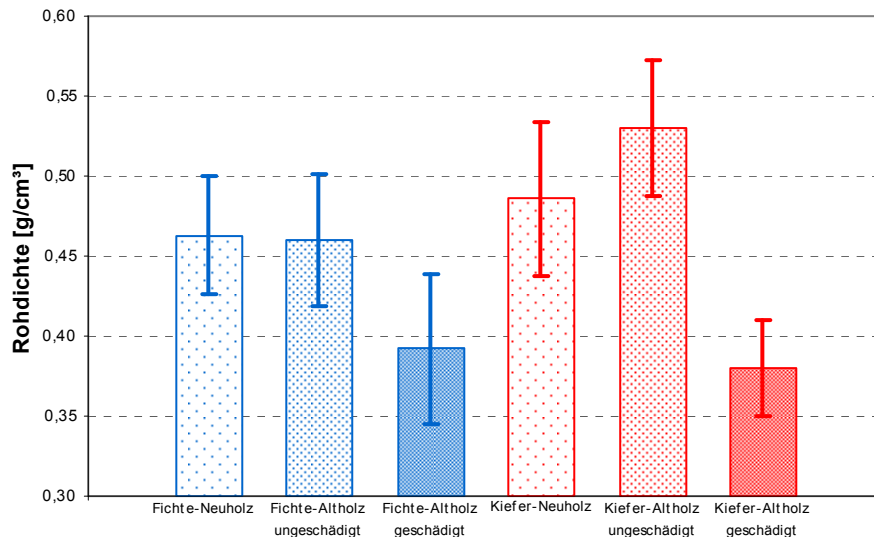


Abb. 116: Rohdichteverteilung der Druckprismen innerhalb der Prüfkategorien

6.4.2.2 Druckfestigkeit

Die durchschnittliche Druckfestigkeit betrug für die alten ungeschädigten Fichtenhölzer 43,2 N/mm² und lag damit etwa 8 % unter den Werten der neuen Fichtenhölzer, die 46,8 N/mm² erreichten (Abb. 117). Dieses Ergebnis ist bemerkenswert, da sich die Rohdichte in der gleichen Größenordnung von 0,46 g/cm³ befand. Bei dem Kiefern-Altholz ergab sich eine Druckfestigkeit von 50,6 N/mm².

Die Festigkeitskennwerte der geschädigten Hölzer sanken auf 66 % (Fichte) bzw. 76 % (Kiefer) im Vergleich zu den jeweiligen Werten der Neuhölzer.

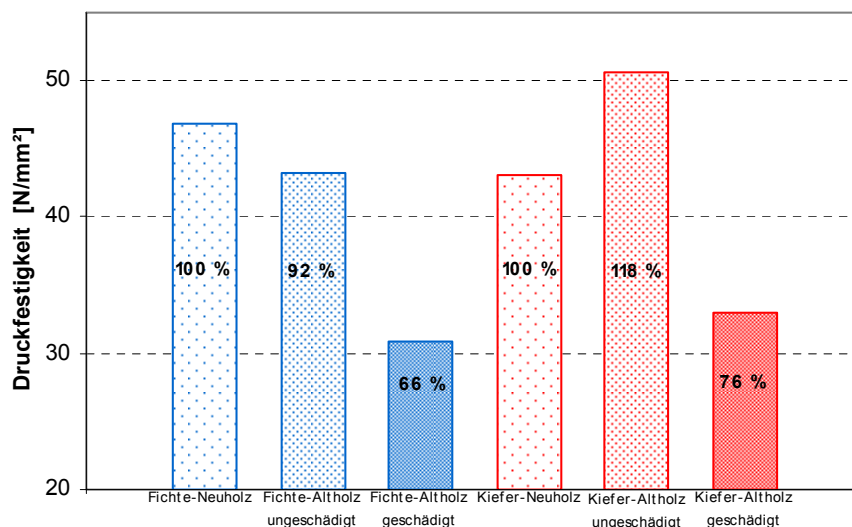


Abb. 117: Druckfestigkeit ($\omega = 12 \%$) der Prismen der Prüfkategorien

Den Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und Rohdichte geben die folgenden Grafiken und die im Anhang in Tab. A-15 angegebenen Gleichungen wieder. Die geprüfte Stichprobe bestätigte den bekannten Zusammenhang der beiden Kenngrößen. Der ermittelte Korrelationskoeffizient von $r_{xy} = 0,77$ für die Fichten-Neuhölzer bzw. 0,72 für die Kiefern-Neuhölzer ist Ausdruck eines deutlichen linearen Zusammenhangs, der in Abb. 118 und Abb. 119 dargestellt ist.

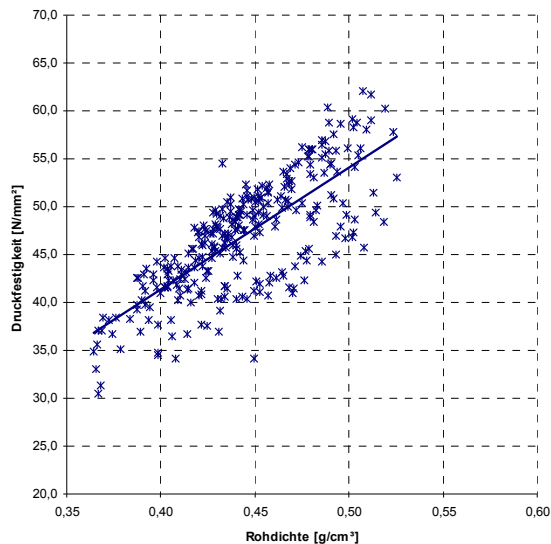


Abb. 118: Zusammenhang von Druckfestigkeit und Rohdichte der Druckprismen der Fichten-Neuhölzer, $r_{xy}=0,77$

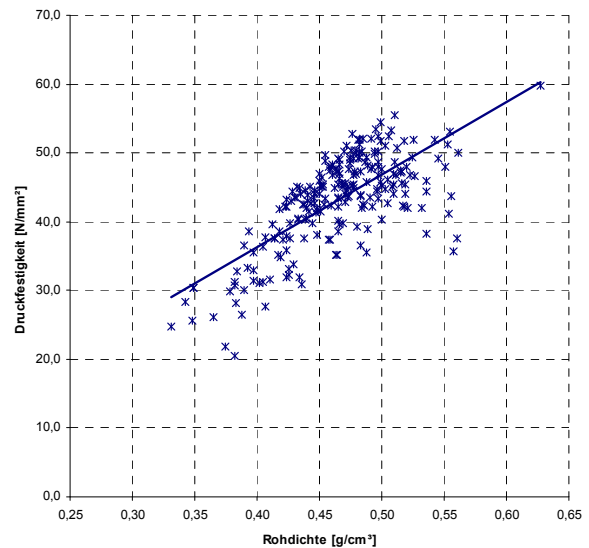


Abb. 119: Zusammenhang von Druckfestigkeit und Rohdichte der Druckprismen der Kiefern-Neuhölzer, $r_{xy}=0,72$

Inhomogenitäten bewirkten starke Schwankungen bei den Ergebnissen und entsprechende Streuungen der Prüfvariablen der Versuchsreihen. Besonders das ungeschädigte Kiefern-Altholz wies bei einem Korrelationskoeffizienten von 0,54 einen nur mäßigen Zusammenhang der beiden Kenngrößen auf. Werden alle geprüften Hölzer zusammengefasst, wird die strenge Korrelation sowohl für Fichte als auch für Kiefer verdeutlicht (Abb. 120).

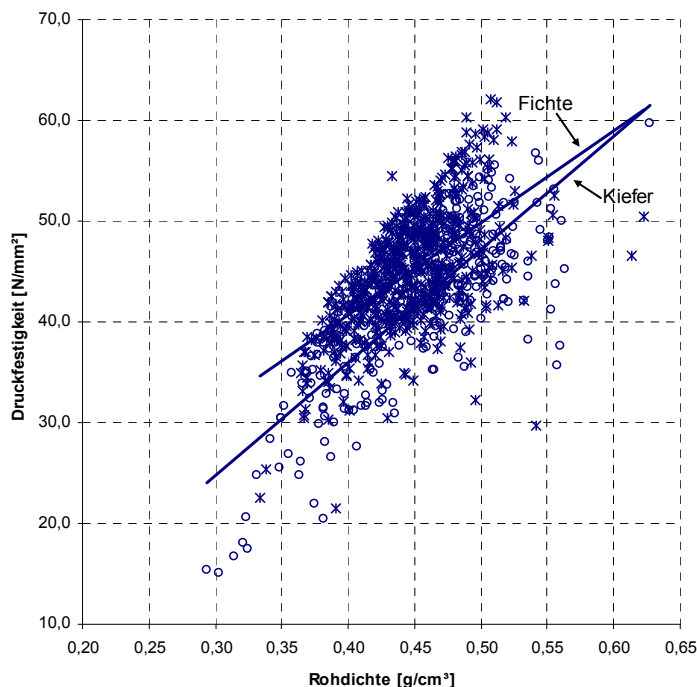


Abb. 120: Zusammenhang von Druckfestigkeit und Rohdichte aller Fichten- ($r_{xy}=0,59$) und Kieferprismen ($r_{xy}=0,79$)

6.4.2.3 Schadensübergangsbereich

Die Einteilung des Schadensübergangsbereiches wurde wie im Kapitel 6.1.5 dargestellt in drei Zonen vorgenommen und deren Festigkeitskennwerte ermittelt.

Nach Auswertung der zu den Bereichen der Schadensübergänge gehörenden Druckprismen verteilte sich die Rohdichte von der Schadenszone 1 abnehmend zur Zone 3. Im Vergleich zur ungeschädigten Zone reduzierte sich dabei die Rohdichte auf 88 % im Übergangsbereich bzw. 76 % im geschädigten Bereich. Eine Auswertung nach Fichte und Kiefer getrennt ergab keine wesentlichen Änderungen der Mittelwerte der Rohdichte bei gleichzeitiger Erhöhung der Variationskoeffizienten. Für die Fichtenhölzer standen für die Auswertung nur wenige Prismen in den Schadenszonen 2 und 3 zur Verfügung, so dass die Kiefernbalcken die Auswertung dominieren.

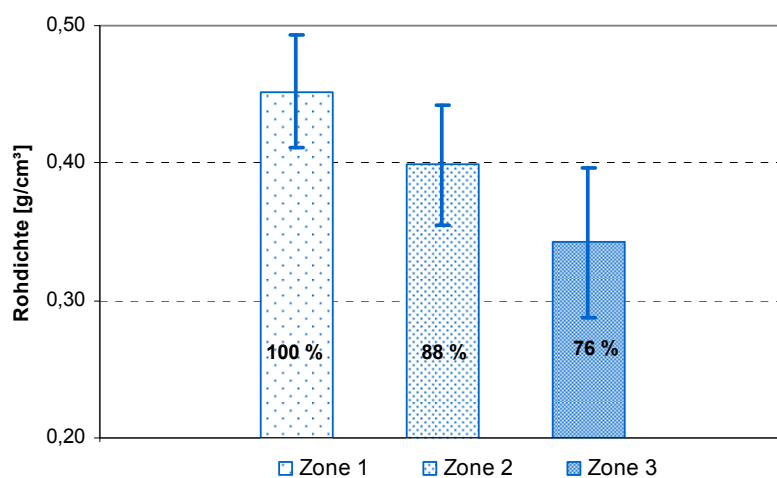


Abb. 121: Rohdichte innerhalb der definierten Schadenszonen der Druckprismen

Die Druckfestigkeit reduzierte sich auf bis zu 50 % der Ausgangsfestigkeit, von 44,6 N/mm² auf 22,3 N/mm², in der Zone 3 (Abb. 122) und damit überproportional zum Verlust der Rohdichte bei einer Schädigung. In Tab. A-17 im Anhang sind die Verteilungskennwerte wiedergegeben, die den ungeschädigten Neu- und Althölzern eine vergleichsweise geringe und den geschädigten Hölzern eine hohe Streuung bescheinigen.

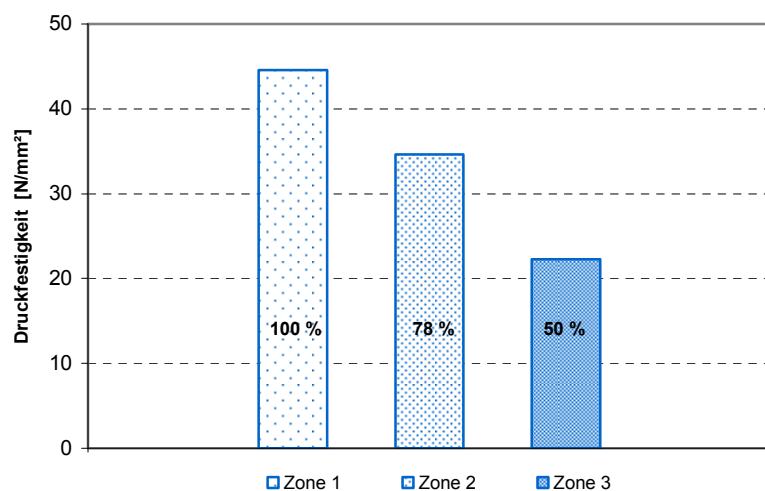


Abb. 122: Druckfestigkeit innerhalb der definierten Schadenszonen der Druckprismen

Der Zusammenhang von Druckfestigkeit und Rohdichte war in der Schadenszone 3 wesentlich deutlicher. Der Anstieg der Regressionsgeraden war steiler, so dass eine

intensivere Festigkeitsverringierung bei sinkender Rohdichte, als es bei gesundem Holz der Fall ist (Abb. 124 bis Abb. 125), abgeleitet werden konnte.

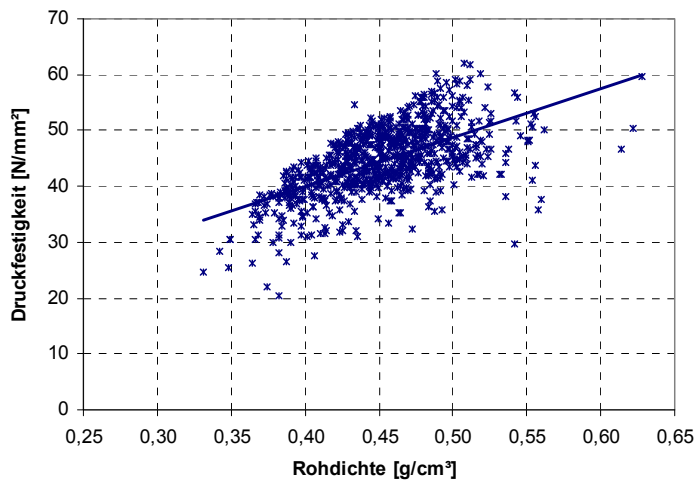


Abb. 123: Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und Rohdichte der Zone 1, $r_{xy} = 0,60$; $\omega = 12\%$

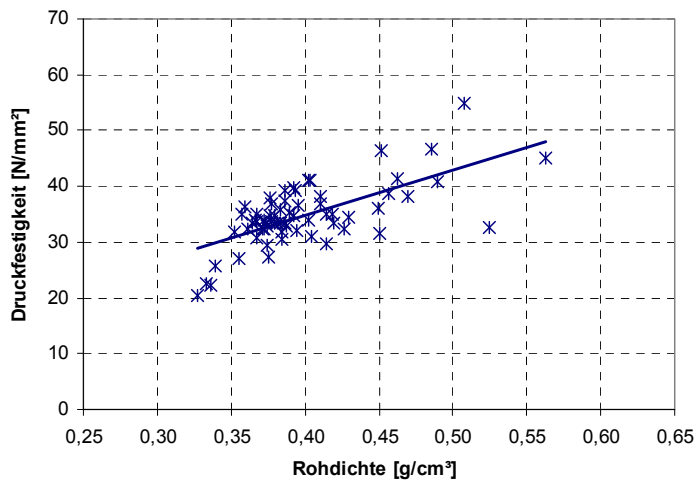


Abb. 124: Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und Rohdichte der Zone 2, $r_{xy} = 0,67$; $\omega = 12\%$

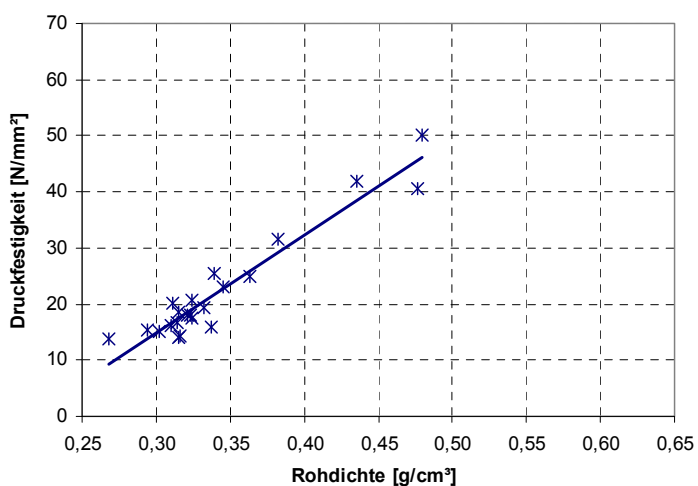


Abb. 125: Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und Rohdichte der Zone 3, $r_{xy} = 0,96$; $\omega = 12\%$

Tab. 15: Verteilungskennwerte der Druckfestigkeit der Prüfprismen in Abhängigkeit vom E-Modul der Schadenszonen 1 bis 3 für Fichte und Kiefer

Zielgröße σ_{D12} [N/mm ²]	Regressionsansatz mit beeinflussender Variable	n [-]	r_{xy} [-]
<u>Schadenszone 1</u>	$\sigma_{D12} = 88,2 \rho_{12} + 4,7$	793	0,60
<u>Schadenszone 2</u>	$\sigma_{D12} = 81,5 \rho_{12} + 2,2$	65	0,67
<u>Schadenszone 3</u>	$\sigma_{D12} = 174,3 \rho_{12} - 37,3$	22	0,96

6.4.3 Zusammenfassung der Ergebnisse der Druckprüfungen

Der strenge Zusammenhang von **Rohdichte** und Druckfestigkeit ist charakteristisch und konnte auch für das geschädigte Holz und die Übergangszone bestätigt werden.

Die **Ausgleichsfeuchte** der klimatisiert gelagerten Prismen lag für die ungeschädigten Althölzer um $\omega = 0,3$ % für die Fichte und $\omega = 1,4$ % für die Kiefer unter denen der Neuhölzer.

Bei Betrachtung des **Schadensübergangsbereiches** war ein Abfall der Rohdichte auf 76 % und der Druckfestigkeit auf 50 % in der Schadenszone 3 bei steigender Streuung festzustellen. Die für gesundes Holz geltende Korrelation von Rohdichte und Druckfestigkeit war bei dem pilzgeschädigten Holz verändert. Geringere Rohdichteänderungen führten dabei zu einem stärkeren Festigkeitsabfall. Innerhalb der Zonen beschreiben Regressionsgleichungen 1. Grades den Zusammenhang gut.

Zur Ergänzung und zum Vergleich sind die in Tab. 16 veröffentlichten Werte den eigenen Ergebnissen gegenübergestellt. In den meisten Veröffentlichungen sind Angaben zu möglichen Schäden oder deren Abgrenzung von gesundem alten Holz nicht zu finden, jedoch erleichtert die Zusammenstellung die Einordnung in den verfügbaren Datenbestand.

Tab. 16: Einordnung der ermittelten Verteilungskennwerte der Druckfestigkeit für die ungeschädigten und geschädigten Nadelhölzer

Quelle	r_{xy} [-]	Empirischer Zusammenhang
<u>Aktuelles Ergebnis</u>	<u>0,76</u>	<u>$\sigma_D = 115,1 \cdot \rho_{12} - 9,3$</u>
[Keylwerth, 1955] in [Nier, 1994]	0,94	$\sigma_D = 97,4 \cdot \rho_{12} - 3,9$
[Nier, 1994]	0,15	$\sigma_D = 77,3 \cdot \rho_{12} + 8,9$
[Rug und Seemann, 1989]	0,46	$\sigma_D = 100,0 \cdot \rho_{12}$

6.5 Biegeprüfungen und Biege-E-Modul

6.5.1 Methodik

Es wurden Prüfungen an Bauteilen in Originalabmessung und an Prismen gemäß DIN 52186 durchgeführt. Bei beiden Prüfeinrichtungen wurde die Krafteinleitung in den Prüfkörper über zwei Punkte (Traverseneintrag) realisiert. Bei gelenkig gelagerten Einfeldträgern mit Lasteinleitung in den Drittelpunkten stellt sich zwischen den Lasteinleitungsstellen eine nahezu gleichgroße Biegebeanspruchung und nahezu Querkraftfreiheit ein. Gleichzeitig erfolgte die Messung des E-Moduls. Der Einfluss von Fehl- oder Störstellen wird sich so deutlicher im Bereich zwischen den Lasteinleitungspunkten abzeichnen, denn das maximale Biegemoment wird über den Abschnitt der Traversenlänge initiiert und damit den am stärksten geschädigten Bereich beanspruchen.

Die Bauteile in Originalabmessung wurden in ihrer ehemaligen Einbaulage in einem Aufspannfeld der Versuchstechnischen Einrichtung an der Bauhaus-Universität Weimar (Abb. 126) geprüft. Sie hatten unterschiedliche Querschnittsabmessungen und waren bis zu 4,0 m lang. Bei den unebenen Auflagerpunkten wurde eine Ausgleichsmasse verwendet, um Spannungsspitzen zu vermeiden. Die Belastungsgeschwindigkeit je Zyklus betrug bei den Balken je nach Geometrie etwa 500 N/s bis zu etwa 1/3 der geschätzten Bruchlast von 10 - 20 kN. Nach dem Durchlaufen von drei Zyklen zur E-Modul-Bestimmung wurde die Bruchlast gemäß DIN 52186 bestimmt.

Die Prismen hatten die Abmessungen von 2 x 2 x 30 - 35 [cm], so dass das empfohlene Stützweiten-Höhen-Verhältnis von 1:15 in einigen Fällen mit 1:12 unterschritten wurde. Für die Untersuchung der Prismen kam die Prüfeinrichtung TIRAtest 24100 (Abb. 127) zum Einsatz. Es wurde mit einer Geschwindigkeit von 20 N/s und vorherigen drei Zyklen bis zum Bruch belastet.

Die Verformung aller Prüfkörper wurde über den Traversenweg und Wegaufnehmer in Probenmitte bzw. bei den Konstruktionshölzern über Wegaufnehmer an den Auflagerpunkten ermittelt.



Abb. 126: Altholzbalken im Aufspannfeld während der Prüfung an der Versuchstechnischen Einrichtung der Bauhaus-Universität Weimar

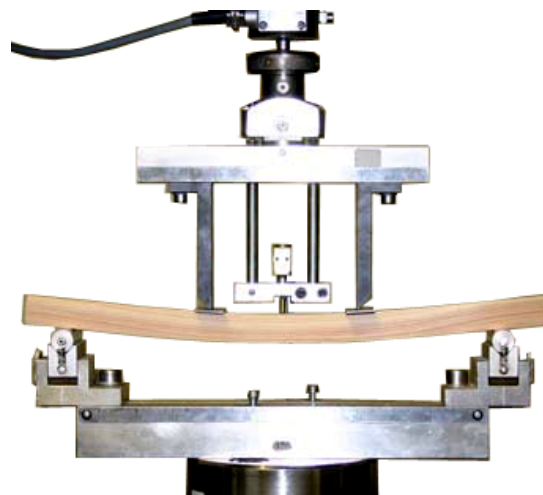


Abb. 127: Prisma während der Prüfung mit der TIRAtest 24100 am F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde

In den recherchierten Veröffentlichungen zu den Altholzfestigkeiten wurde bei der Berechnung der Festigkeiten aus der Bruchkraft immer ein idealer Rechteckquerschnitt angesetzt,

für den die im Anhang wiedergegebenen Gleichungen gelten. Diese Vorgehensweise hat bei Fehlstellen oder Verformungen Ungenauigkeiten bei der E-Modul- und Festigkeitsermittlung zur Folge. Aus diesem Grund wurde nach einer Möglichkeit gesucht, den realen unregelmäßigen Querschnitt zu ermitteln und in die Berechnung einfließen zu lassen.

Für die statischen Kennwerte waren daher der Nettoquerschnitt und der daraus resultierende Flächenschwerpunkt sowie das Trägheits- und das Widerstandsmoment erforderlich. Die Aufnahme des Nettoquerschnitts der geschädigten Konstruktionshölzer erfolgte nach mechanischer Reinigung der Befallsstellen mit dem Maurerhammer bzw. dem Berliner Hammer und einer Drahtbürste. Es wurden nur die losen geschädigten Querschnittsbereiche entfernt und nicht „bebeilt“, wie das im Zuge einer Schadenssanierung durchgeführt werden würde. Der teiltragfähige, aber schadhafte Randbereich sollte bewusst erhalten werden, um an ihm weitere Untersuchungen durchführen zu können. Mit einem Profilkamm wurde an ausgewählten Stellen in Längsrichtung die Querschnittsgeometrie im Maßstab 1:1 aufgenommen, digitalisiert und mittels Vektorisierung für die Auswertung vorbereitet (Abb. 128).

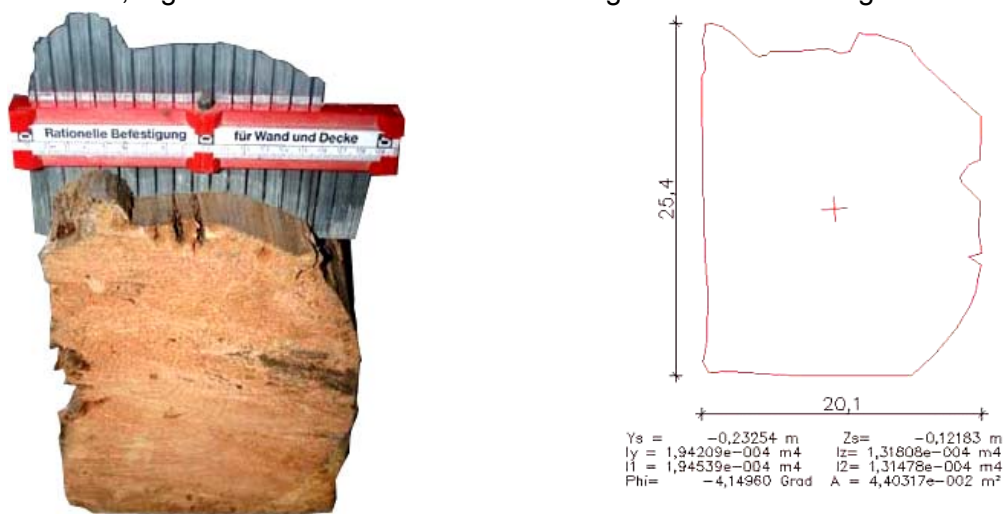


Abb. 128: Profilaufnahme Balkenquerschnitt (links) und daraus generierte Querschnittswerte (rechts), Darstellung hier an unterschiedlichen Trägerstellen

Trotz der unregelmäßig geformten Querschnitte war es so möglich, die reale Geometrie mit dem zugehörigen Trägheits- und Widerstandsmoment zu ermitteln. Die neutrale Faser wird durch den Flächenschwerpunkt mit $z = 0$ und $\sigma_x = 0$ gelegt, so dass sich das Widerstandsmoment der Zugzone, dem Bereich der maximalen Biegespannung an der unteren Faser, aus Gl. 6-2 ergibt.

Sowohl bei den Konstruktionshölzern als auch bei den Groß- und Kleinprüfkörpern erfolgte die geometrische Erfassung mindestens im Bereich der beiden Enden und in der Mitte. Aus den Einzeldaten wurde bei den Prismen der Mittelwert gebildet, bei den Altholzbalken wurde der aufgenommene Querschnitt an der Versagensstelle zugrunde gelegt.

Die Biegefestigkeit wird als Quotient aus dem größten Biegemoment und dem Widerstandsmoment der Probe errechnet. Mit dem oben beschriebenen Verfahren wurde der Flächenschwerpunkt des unregelmäßigen Querschnitts ermittelt, durch den die neutrale und spannungsfreie Faser verläuft. Somit konnte der Abstand z zur zugbeanspruchten Faser des unteren Randes errechnet werden. Diese Vorgehensweise setzt eine mehr oder weniger gleichmäßige Spannungsverteilung über den Querschnitt voraus, so dass die getroffenen Annahmen Näherungswerte darstellen.

Für den unregelmäßigen Querschnitt ergibt sich die Biegerandspannung aus folgender Gleichung:

$$\sigma_B = \frac{M_y}{I_y} \cdot z \quad \text{Gl. 6-1}$$

mit: σ_B Biegespannung [N/mm²]
 M_y Biegemoment [Nmm]
 I_y axiales Flächenträgheitsmoment [mm⁴]
 z Abstand von der Nulllinie [mm]

Das Moment wird durch die Kraft und die Systemgeometrie ausgetauscht und man erhält die folgende Formel für die unregelmäßigen Querschnitte

$$\sigma_B = \frac{F \cdot (l_s - l')}{4 \cdot I_y} \cdot z \quad \text{Gl. 6-2}$$

Die Formelzeichen sind nach Gl. 6-3 aufgeführt.

Um eine Vergleichsbasis zu erhalten, wurde bei Abweichungen von der Normausgleichsfeuchte von der gemessenen auf eine Vergleichsspannung bei $\omega = 12 \%$ der im Anhang aufgeführten Gl. A-28 umgerechnet.

Mit der Prüfung der Biegefestigkeit wurde der Biege-Elastizitätsmodul ermittelt, der eine Kenngröße für die Verformungssteifigkeit der Probe im elastischen Bereich ist. Für Prüfkörper in Originalabmessungen ist die Annahme einer linearen Abhängigkeit der E-Modul-relevanten Spannung und Dehnung möglich, da das Versagen des Gesamtprüfkörpers durch Inhomogenitätskriterien bereits unterhalb des Erreichens der Elastizitätsgrenze erfolgt. Der durchschnittliche E-Modul für Rechteckquerschnitte errechnet sich nach DIN 52186 aus der elastischen Durchbiegung der Probe. Er wird für die gewählte Lastanordnung über die Stützweite l_s wie folgt ermittelt:

$$E_B = \frac{(2 \cdot l_s^3 - 3 \cdot l_s \cdot l'^2 + l'^3)}{8 \cdot b \cdot h^3} \cdot \frac{\Delta F}{\Delta f} \quad \text{Gl. 6-3}$$

mit: E_B Biege-E-Modul [N/mm²]
 l_s Stützweite [mm]
 l' Abstand der Kraftangriffspunkte [mm]
 b Probenbreite [mm]
 h Probenhöhe [mm]
 F Kraft [N]
 ΔF Kraftdifferenz im elastischen Bereich der Probe [N]
 Δf Durchbiegung in Trägermitte [mm], der Kraftdifferenz zugehörig

Für unregelmäßige Querschnitte musste der Zusammenhang aus Gl. 6-3 transformiert werden:

$$\rightarrow E_B = \frac{\zeta}{8 \cdot b \cdot h^3} \cdot \frac{\Delta F}{\Delta f} \rightarrow E_B = \frac{12 \cdot \zeta}{96 \cdot b \cdot h^3} \cdot \frac{\Delta F}{\Delta f}$$

→ Substitution des Flächenmomentes 2. Ordnung

$$\rightarrow E_B = \frac{\zeta}{96 \cdot I_y} \cdot \frac{\Delta F}{\Delta f}$$

$$\rightarrow E_B = \frac{2 \cdot l_s^3 - 3 \cdot l_s \cdot l'^2 + l'^3}{96 \cdot I_y} \cdot \frac{\Delta F}{\Delta f}$$

Gl. 6-4

Da der E-Modul aus der Gesamtverformung ermittelt wird, wird auch eine anteilige Schubverformung berücksichtigt. Die hier geprüften Balken und Prismen besitzen Schlankheiten von $\lambda \approx 15$.

6.5.2 Messergebnisse und Auswertung

6.5.2.1 Balken

6.5.2.1.1 Kennwerte

Die Prüfung der 27 Balken wurde zeitnah nach dem Transport, der geometrischen und der technischen Aufnahme durchgeführt. Unmittelbar nach dem Bruch wurden der Feuchtegehalt nahe der Versagensstelle (Abb. 129) sowie die mittlere Rohdichte (Abb. 130) ermittelt.

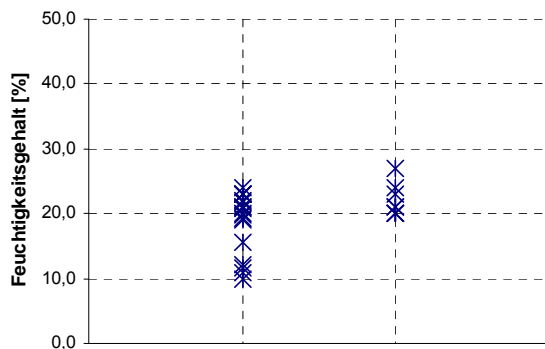


Abb. 129: Feuchtegehalte der Prüfbalken

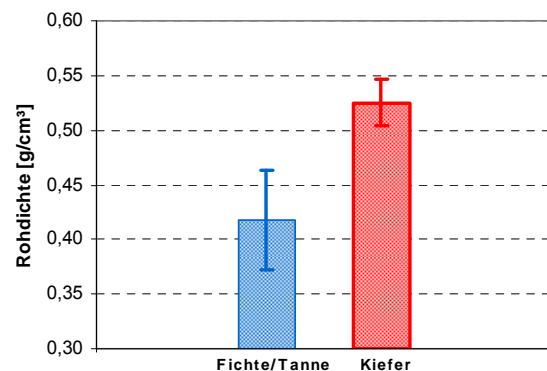


Abb. 130: Rohdichte der Prüfbalken

Die Altholzbalken wurden vor der Prüfung nach Kapitel 6.1.3 nachsortiert. Die Herabstufung in die nächste darunter liegende Klasse war im Wesentlichen durch hohe Ästigkeiten und bei einer Serie durch die starke Rissbildung bedingt. Bei zwei Balken fand eine Herabstufung durch die zu starke Faserneigung statt. Abb. 133 und Tab. 17 geben die sich aus den Sortierkriterien ergebende Einstufung und die Verteilung in den Klassen wieder.

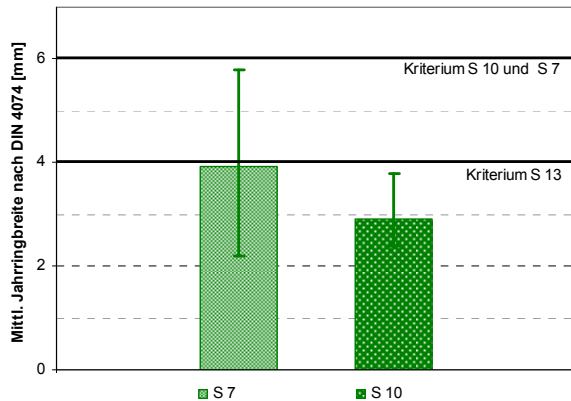


Abb. 131: Mittlere Jahrringbreiten der Sortierklassen

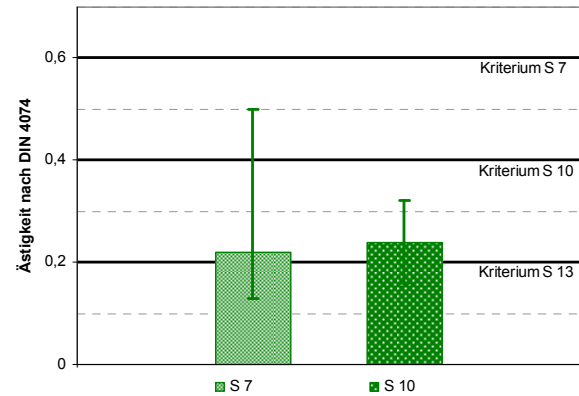


Abb. 132: Ästigkeit der Sortierklassen

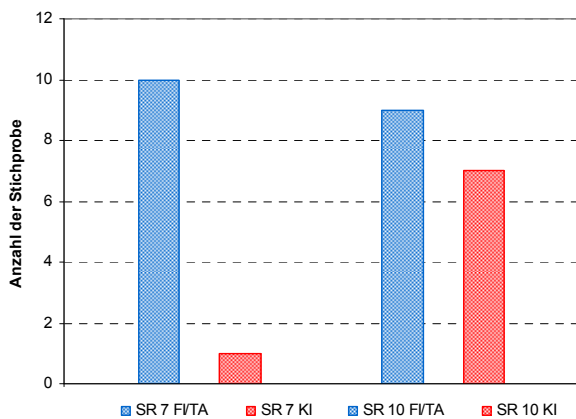


Abb. 133: Anzahl der Holzarten in den Sortierklassen

Tab. 17: Sortierklassen der Prüfbalken

S _R 7	S _R 10	S _R 13
41 %	59 %	0 %
10 x Fichte/Tanne 1 x Kiefer	9 x Fichte/Tanne 7 x Kiefer	-

6.5.2.1.2 Bruchverhalten

Nach Ermittlung des E-Moduls wurde die Prüfung bis zum Bruch durchgeführt. Nahezu alle Balken kündigten den Bruch mit deutlich hörbarem knisterndem Geräusch bei etwa 50 % bis 70 % der Bruchlast an. Das Knistern rührt vom Versagen der ersten Randfasern her, deren seitlicher Verbund nachgibt. Je trockener das Holz ist, umso deutlicher ist das hörbar, da die Feuchtigkeit die Sprödigkeit und Elastizität beeinflusst. Die Proportionalitätsgrenze wurde bei etwa 70 % bis 80 % der Bruchlast erreicht. Das heißt, dass bereits vor dem Erreichen der Grenze das Versagen deutlich hörbar wird.

In den meisten Fällen führten Äste oder sonstige Kerbspannungen verursachende Inhomogenitäten zum Versagen der Prüfkörper (Abb. 134). Bei wenigen Balken stellten die Querschnittsbereiche mit Ausklinkungen bzw. Zapfenlöcher die Schwachpunkte dar (Abb. 135).



Abb. 134: Bruch eines Prüfbalkens ausgehend von einem Astquirl



Abb. 135: Bruch eines Prüfbalkens ausgehend von einer Ausklüftung in der Zugzone

Durch die recht unterschiedlichen Vorschädigungen lag die geschätzte maximale Zyklusbelastung für die E-Modul-Ermittlung teilweise nicht nur im 1. Drittel der Hooke'schen Geraden, sondern auch darüber. Stark unter Spannung stehende und spröde Strukturen führten zu partiellen Ausfällen (Knacken und Krachen) ohne das Versagen des Gesamtbauteiles einzuleiten. Mit dem Abbau von Spannungsspitzen kommt es zur Umlagerung der Kräfte, so dass ein weiterer Lasteintrag bis zum Erreichen der Proportionalitätsgrenze erfolgen konnte. Die Effekte der Lastumlagerung mit daraus resultierendem Anstieg der aufnehmbaren Spannungen wurden auch im plastischen Bereich gefunden (Abb. 136).

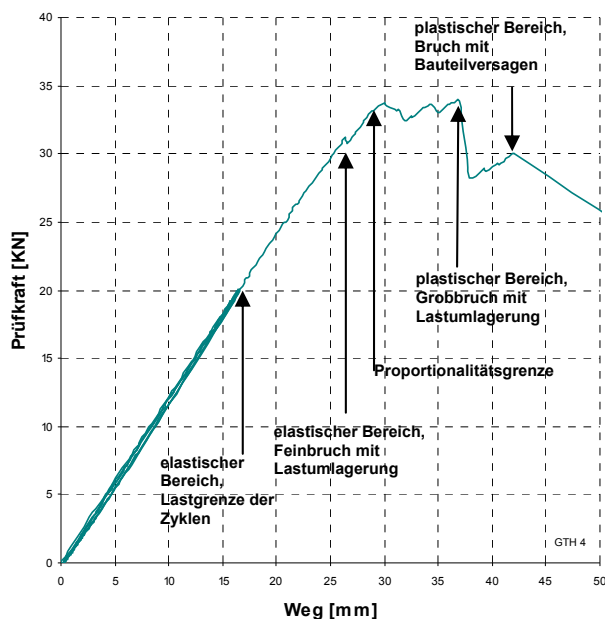


Abb. 136: Kraft-Weg-Diagramm eines geschädigten Balkens (Tanne)

Durch die unterschiedlichen Querschnitte und Schädigungsstufen ist die Spreizung der Kraft-Weg-Diagramme im elastischen Bereich sehr groß. Die zunächst große Streuung ergibt sich aus unterschiedlichen geometrischen Aspekten (z. B. statisch relevanter Querschnitt einschließlich vorhandener Fehlstellen), technisch-anatomischen Aspekten (z. B. Holzart, Rohdichte, Äste und Astquirl, Feuchtegehalt) oder Schadensaspekten (z. B. Schadenstiefe oder Schadensintensität).

Die Kombination von Ästen und den Braunfäuleschädigungen beeinflusste das Bruchverhalten dahingehend negativ, dass einerseits Schubkräfte im Krafteinleitungsbereich nicht vollständig abgeleitet werden konnten und andererseits der Effekt aus den Inhomogenitäten verstärkt wurde und damit die Astbereiche häufig den Initialbruchbereich darstellten (Tab. 18).

Nach den durchgeführten Prüfungen bis zum Bruch des Balkens kann festgestellt werden, dass ein Versagen überwiegend von Ästen bzw. Astquirlen ausging.

Die reduzierte Kraftübertragung der geschädigten Partien wurde über ein kurz- bis mittelfaseriges Bruchbild deutlich, das bei den ungeschädigten Querschnittspartien langfaserig und zur Schadstelle hin kurzfaseriger war.

Tab. 18: Bruchursachen der Balken

Bruchursache	Anzahl Altholzbalken (Mehrfachnennung möglich)
Biegung	3
Schub und Biegung	5
Ästigkeit	13
Schädigung, mechanisch	5
Schädigung, biologisch	4

6.5.2.1.3 Biegefestigkeit und E-Modul

Die Biegefestigkeit und der Biege-E-Modul wurden zunächst über den „klassischen“ Ansatz eines Rechteckquerschnittes ermittelt und anschließend unter Berücksichtigung des realen und teilweise geschädigten unregelmäßigen Querschnitts verglichen. Da der Rechteckquerschnitt über die projizierten äußeren Abmessungen definiert wird und bei der Ermittlung des realen Querschnittes die im Vergleich dazu fehlenden Stellen bei einer Schädigung nicht angesetzt werden, liegen die Biegefestigkeiten und E-Modulwerte insgesamt höher. Sie streuen allerdings auch etwas stärker, da die geringe Probenzahl bei Betrachtung innerhalb der Sortierklassengruppe und die Inhomogenität des gesamten Prüfkollektivs einfließen. Die statistischen Verteilungskennwerte in Tab. 19 geben einen Überblick über die Streuparameter im Vergleich beider Querschnittsansätze.

Tab. 19: Verteilungskennwerte der Biegeprüfungen der Altholzbalken

Prüfkriterium [N/mm ²]	n [-]	\bar{x}	s	v [%]
<u>Projizierter Querschnitt</u>				
σ_{B12}	27	20,91	6,22	30
E_{12}	27	6.100	2.123	35
<u>Realer Querschnitt</u>				
σ_{B12}	27	28,26	10,38	37
E_{12}	27	8.074	3.224	40

Unter Berücksichtigung des Feuchtegehaltes zum Prüfzeitpunkt der Balken wurden Biegefestigkeit und E-Modul, mit dem Ergebnis einer Verbesserung der Streuung um die Regressionsgerade gegenübergestellt (Abb. 137). Bei zusätzlicher Betrachtung der Sortierklasseneinstufung konnte für die geprüften Nadelhölzer ein sehr deutlicher

Zusammenhang zwischen Biegefestigkeit und E-Modul ermittelt werden (Tab. 20). Die Streuungen liegen in den unterschiedlichen Schädigungsgraden begründet. Während in der $S_R 7$ vor allem weniger geschädigte Althölzer (insbesondere Serie GTH) zu finden waren und die Gruppe dominieren, sind es in der $S_R 10$ insbesondere bei den Fichtenhölzern sehr unterschiedliche Ausgangskennwerte und Schädigungsgrade. Die Zielkorrelation bei der Auswertung bedingt sich durch die bei der linearen Regressionsanalyse zugrunde gelegte lineare Abhängigkeit des Verhältnisses von Spannung zur Dehnung.

Der E-Modul wird bei etwa 1/3 der Bruchlast ermittelt, die jedoch schon davor die lineare Proportionalität durch geringeren Anstieg der Belastungskurve verlässt. Da das Versagen vor dem Erreichen der Proportionalitätsgrenze beispielsweise durch Äste der Bauteile in Originalabmessungen eintritt, wird die Einstufung der Biegefestigkeit über den E-Modul überbewertet. Die Ableitung der Festigkeit von prismatischen Normprüfkörpern ist realistischer, da bei diesen das Versagen aus Sortierkriterien nicht eintreten kann. Daher kann abgeleitet werden, dass der Einfluss der Schädigungen der Balken nur bis zu einer bestimmten Ästigkeit und Schwächung des Querschnittes vorhanden ist. Der Bruch ging bei den untersuchten Bauteilen häufig von größeren Ästen aus und bestätigt, dass die statische Beeinträchtigung durch die Schädigung von den Inhomogenitäten, insbesondere der Ästigkeit, überlagert wird.

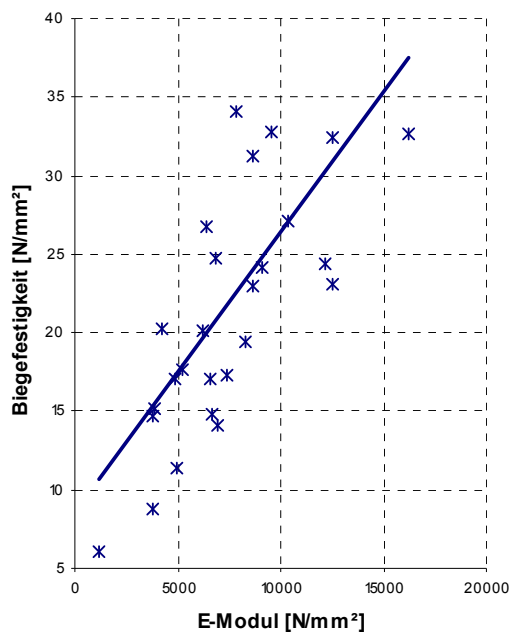


Abb. 137: Zusammenhang von Biegefestigkeit und E-Modul unter Berücksichtigung des realen Querschnitts, $r_{xy} = 0,68$

Tab. 20: Verteilungskennwerte der Biegefestigkeit der Altholzbalken in Abhängigkeit vom E-Modul

Zielgröße	Regressionsansatz mit beeinflussender Variable	n	r_{xy}
σ_B [N/mm ²]		[-]	[-]
<u>projizierter</u> Rechteck- querschnitt	$\sigma_{B0} = 0,0013 E_0 + 8,6$	27	0,58
Nadelhölzer gesamt	$\sigma_{B12} = 0,0011 E_{12} + 14,0$	27	0,39
<u>realer</u> Querschnitt	$\sigma_{B0} = 0,0018 E_0 + 8,5$	27	0,68
Nadelhölzer gesamt	$\sigma_{B12} = 0,0016 E_{12} + 15,2$	27	0,50

6.5.2.2 Holzprismen

6.5.2.2.1 Kennwerte

Der Trend, dass die Althölzer eine geringere Ausgleichsfeuchtigkeit besitzen als die Neuhölzer, konnte hier bei Betrachtung des Mittelwertes bestätigt werden. Allerdings war die Streubreite bei den Fichten-Althölzern recht hoch ($v = 23 \%$).

Die Rohdichte der Kiefern-Althölzer war um etwa 8 % höher ($0,50 \text{ g/cm}^3$) gegenüber den Neuhölzern ($0,46 \text{ g/cm}^3$), die Altholzprüfkörper der Fichte waren auf einem vergleichsweise geringen Rohdichteniveau von $0,43 \text{ g/cm}^3$. Die mittlere Streuung der Rohdichte der Kiefernprismen ($v = 11 \%$) lag etwas über der der Fichtenprismen ($v = 7 \%$).

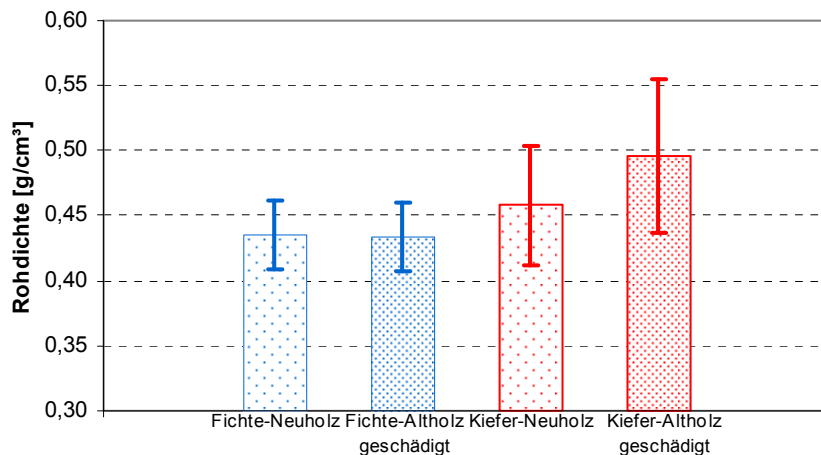


Abb. 138: Rohdichteverteilung der Biegeprismen

6.5.2.2.2 Biegefestigkeit und E-Modul

Die Biegefestigkeiten und die E-Moduli der Fichtenprüfkörper waren größer als die der Kiefer obgleich die Rohdichten der Kiefer deutlich über denen der Fichte lagen. Bei der Prüfung der Kiefernprismen war auffällig, dass vor dem eigentlichen Versagen Plastifizierungen und damit das Verlassen der Proportionalitätsgeraden durch teilweises Ablösen von Faserbereichen und der Durchbiegung auftraten. Es muss in diesem Zusammenhang von anatomischen Abweichungen, also zusätzlichen Inhomogenitäten, ausgegangen werden.

Die Streuung der Spannungs- und E-Modulwerte sind mit Variationskoeffizienten von 23 % bis 30 % relativ hoch, was für die geschädigten Hölzer durchaus erwartet wurde, für die Neuhölzer jedoch weniger typisch ist.

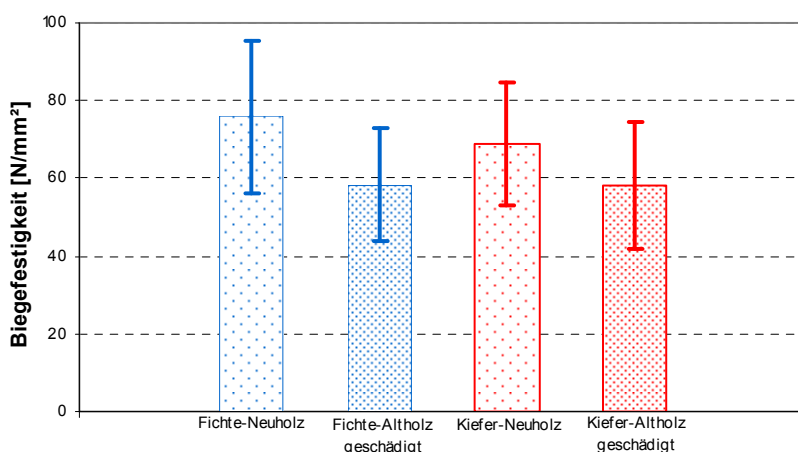


Abb. 139: Biegefestigkeit ($\omega = 12 \%$) der Prismen der Neu- und geschädigten Althölzer

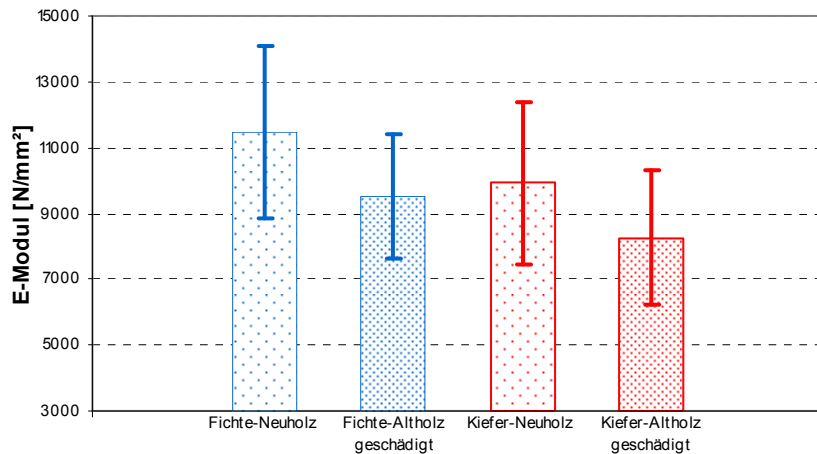


Abb. 140: E-Modul ($\omega = 12\%$) der Prismen der Neu- und geschädigten Althölzer

Der Zusammenhang zwischen Biegefestigkeit und Rohdichte konnte mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,66 für die Kiefern-Neuhölzer dargestellt werden. Für alle Fichtenhölzer zusammen betrug $r_{xy} = 0,37$ (Abb. 141) und für alle Kiefernholz zusammen $r_{xy} = 0,36$. Der Zusammenhang ist als schwach zu bewerten. Auffällig hierbei war die recht weite Streuung des unteren Bereiches der Punktwolke. In diesen Bereich fielen insbesondere Prismen, die geschädigten Querbalken entstammen. Frühe Schädigungsstadien bewirkten einen nur geringen Verlust der Rohdichte, führten jedoch zu einer erheblichen Festigkeitsreduzierung. Zudem führten die Einflüsse unterschiedlicher Ausgleichsfeuchten zur Aufspreizung der Kennwerte.

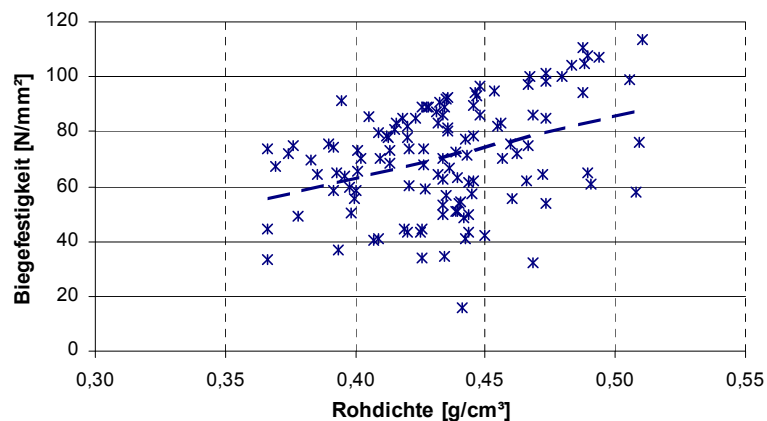


Abb. 141: Biegefestigkeit und Rohdichte aller Fichten-Neu- und Altholzprismen, $r_{xy} = 0,37$

Unter Berücksichtigung des Feuchtegehaltes zum Prüfzeitpunkt der Prismen wurde der Zusammenhang der Biegefestigkeit und des E-Moduls geprüft. Trotz vergleichsweise hoher Variationskoeffizienten der Einzelkriterien Biegefestigkeit und E-Modul fallen die Korrelationen beider Größen sehr gut aus (Tab. 21). In Abb. 142 und Abb. 143 ist beispielhaft der Zusammenhang für die Fichten- und Kiefernholz dargestellt.

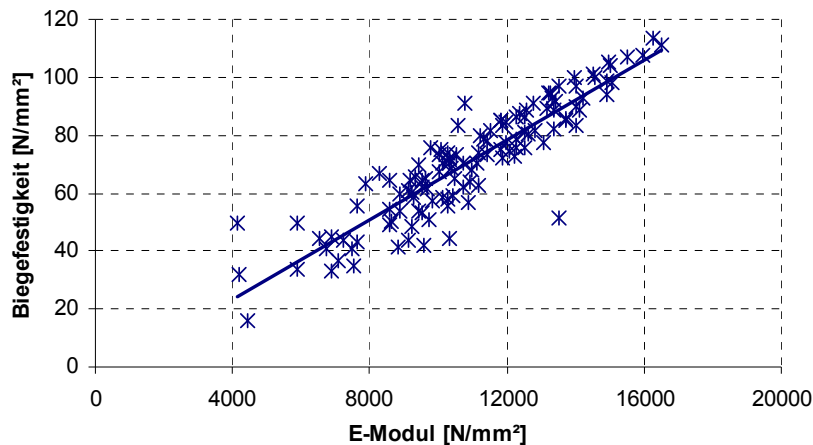


Abb. 142: Zusammenhang von Biegefestigkeit und E-Modul der geprüften Fichtenprismen,
 $r_{xy} = 0,90$

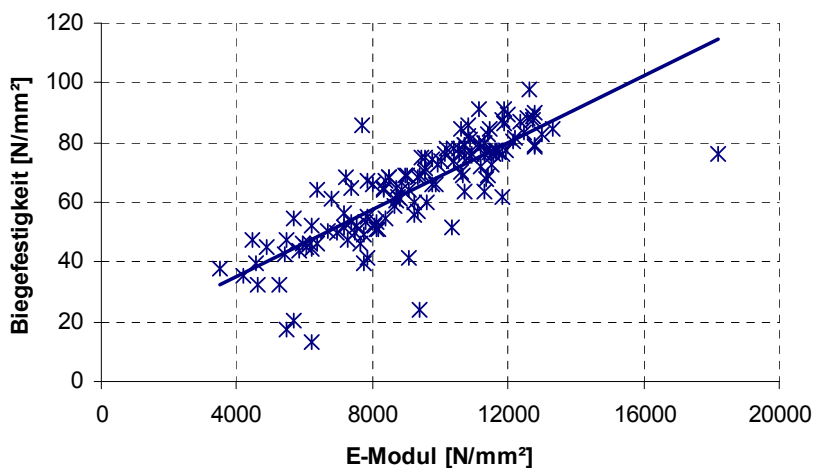


Abb. 143: Zusammenhang von Biegefestigkeit und E-Modul der geprüften Kiefernprismen,
 $r_{xy} = 0,81$

Tab. 21: Verteilungskennwerte der Biegefestigkeit der Prüfprismen in Abhängigkeit vom E-Modul

Zielgröße σ_{B12} [N/mm ²]	Regressionsansatz mit beeinflussender Variable	n [-]	r_{xy} [-]
Fichte- gesamt	$\sigma_{B12} = 0,0069 E_{12} - 4,1$	122	0,90
Fichten-Neuholz	$\sigma_{B12} = 0,0066 E_{12} - 0,3$	88	0,90
Fichten-Altholz, geschädigt	$\sigma_{B12} = 0,0065 E_{12} - 3,3$	34	0,84
Kiefer- gesamt	$\sigma_{B12} = 0,0056 E_{12} + 12,8$	135	0,81
Kiefern-Neuholz	$\sigma_{B12} = 0,0055 E_{12} + 14,6$	87	0,84
Kiefern-Altholz, geschädigt	$\sigma_{B12} = 0,0056 E_{12} + 11,7$	48	0,70
Nadelhölzer, geschädigt	$\sigma_{B12} = 0,0054 E_{12} + 10,7$	82	0,72

Aus den ermittelten Festigkeitskennwerten waren unter Berücksichtigung der geringen Probenzahl Trends ablesbar. Gemäß des Fortschritts der Pilzschädigung sanken die Biegefestigkeit und der E-Modul. Es konnte nachgewiesen werden, dass auch für die geschädigten Hölzer von linearen Zusammenhängen der Biegefestigkeit und des E-Moduls ausgegangen werden kann. Die Streuung nach Regression war bei den Prismen aufgrund des Ausschlusses von Holzfehlern kleiner als bei den Bauteilen in Originalabmessung.

6.5.2.2.3 Schadensübergangsbereich

Die Probekörper wurden mit den drei Schadenszonen abgeglichen und geprüft. Die Bruchbilder der Schadenszone 3 (geschädigt) waren überwiegend kurzfasrig, die der Zone 1 eher langfasrig. Bei Vergleich der Mittelwerte der Festigkeiten war der Trend des Abfalls der geprüften Festigkeitskennwerte von Zone 1 zu Zone 3 festzustellen. Bei Ansatz der optisch gesund erscheinenden Zone 1 mit 100 % reduzierte sich die Biegefestigkeit auf 77 % in Zone 2 und 63 % in Zone 3. Dieser Trend war für den E-Modul ebenfalls ablesbar, wenn auch nicht ganz so deutlich. Er reduzierte sich in der Schadenszone 2 auf 75 % und der Zone 3 auf 70 % des E-Moduls der gesund erscheinenden Bereiche. Wie der Tab. A-22 im Anhang zu entnehmen ist, standen für die Untersuchung der Schadenszone 2 nur 21 und der Schadenszone 3 nur 24 Prismen zur Verfügung. Zudem war festzustellen, dass relativ hohe Variationskoeffizienten aufgrund der verschiedenen Hölzer und Rohdichten vorliegen.

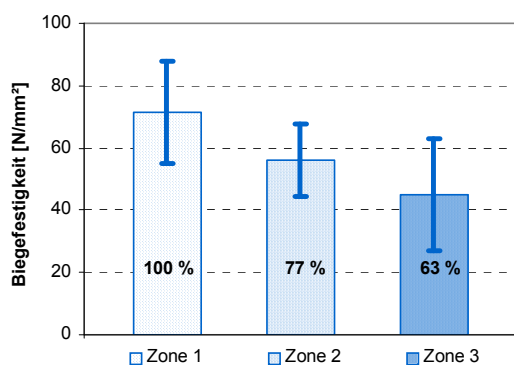


Abb. 144: Biegefestigkeit ($\omega = 12\%$) aller geprüften Hölzer der Schadenszonen 1 bis 3

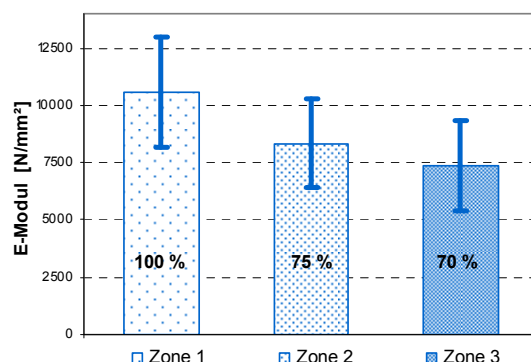


Abb. 145: E-Moduli ($\omega = 12\%$) aller geprüften Hölzer der Schadenszonen 1 bis 3

Unter der Maßgabe noch weiter zu differenzieren, fand eine Prüfung der Schadenszonen innerhalb der jeweiligen Holzart statt. In Abb. 146 sind die Biegefestigkeiten der geprüften Holzarten und Zonen dargestellt. Bei den Fichten-Althölzern musste mangels Verfügbarkeit mit einer geringen Anzahl von Datensätzen in den Zonen 2 und 3 gearbeitet werden, so dass eine Verallgemeinerung der folgend dargestellten Trends nicht möglich ist.

Die Abnahme der Festigkeitskennwerte von der Schadenszone 1 (100 %) bis hin zur stark geschädigten Zone 3 wurde für die Fichtenhölzer auf 43 % und die Kiefernholz auf 70 % ermittelt. Der Vergleich der E-Moduli der Prismen innerhalb der Schadenszonen für den Vergleich der Holzarten untereinander ist in Abb. 147 dargestellt. Auch hier sank mit zunehmender Schadensklassifizierung der E-Modul. Interessant dabei war, dass der E-Modul der Kiefer in Zone 3 im Vergleich zur Zone 2 nicht abfiel, obwohl dies nach Vergleich mit der Biegefestigkeit in Abb. 146 zu erwarten gewesen war. Hier muss wieder auf die vergleichsweise geringe Anzahl der Datensätze hingewiesen werden.

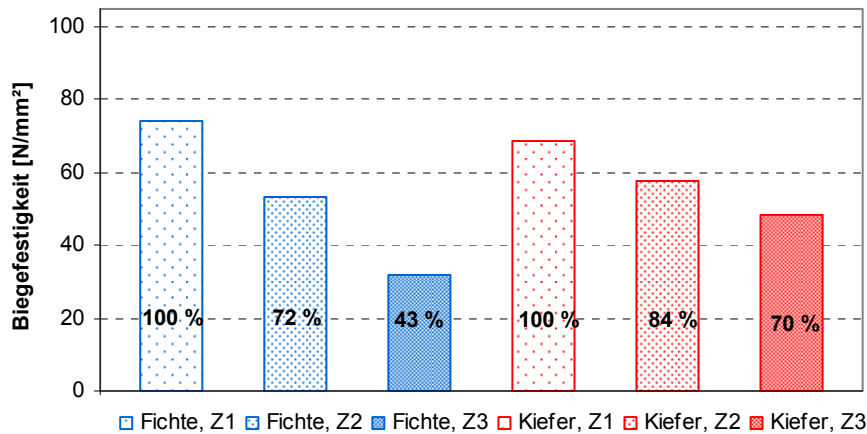


Abb. 146: Biegefestigkeiten der Prismen nach Zuordnung zu den Schadenszonen

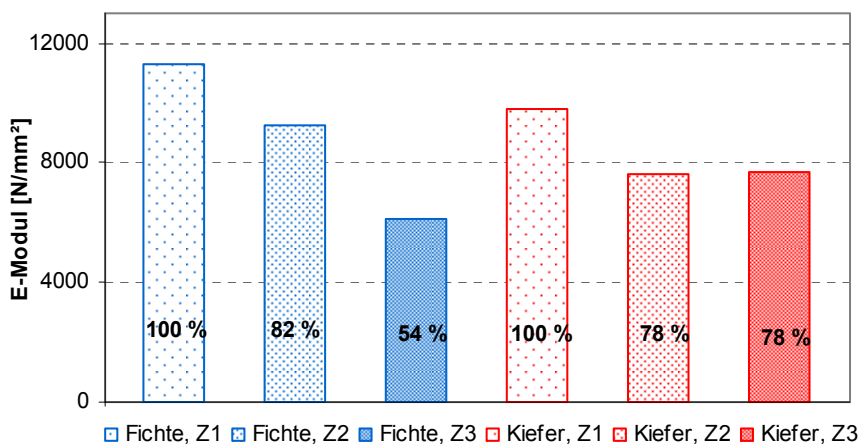


Abb. 147: E-Moduli der Prismen nach Zuordnung zu den Schadenszonen

Der ermittelte Zusammenhang von Biegefestigkeit und E-Modul verdeutlicht die Abhängigkeit der Kenngrößen auch innerhalb der Schadenszonen.

Insgesamt korrelierten die Biegefestigkeit und der E-Modul der Kiefernholzer deutlich mit einem Koeffizienten von 0,83 (Abb. 148) in der Zone 1 und in Zone 3 mit noch 0,73. Der vergleichsweise schlecht darstellbare Zusammenhang für das Fichtenholz resultierte in den Schadenszonen 2 und 3 wahrscheinlich aus der geringen Probenanzahl und entsprechender Streuung.

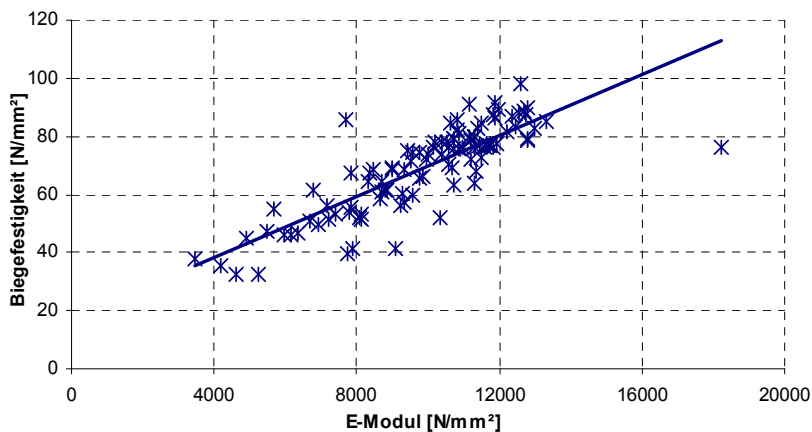


Abb. 148: Zusammenhang von Biegefestigkeit und E-Modul der Kiefernholzer der Schadenszone 1, $r_{xy} = 0,83$

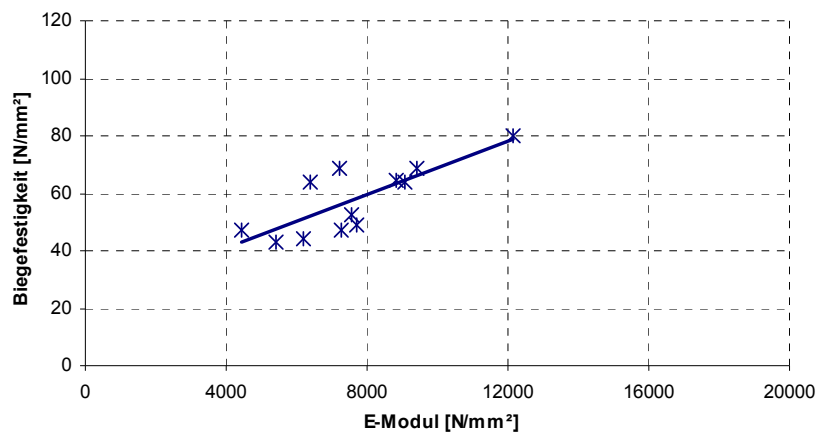


Abb. 149: Zusammenhang von Biegefestigkeit und E-Modul der Kiefernholz der Schadenszone 2, $r_{xy} = 0,79$

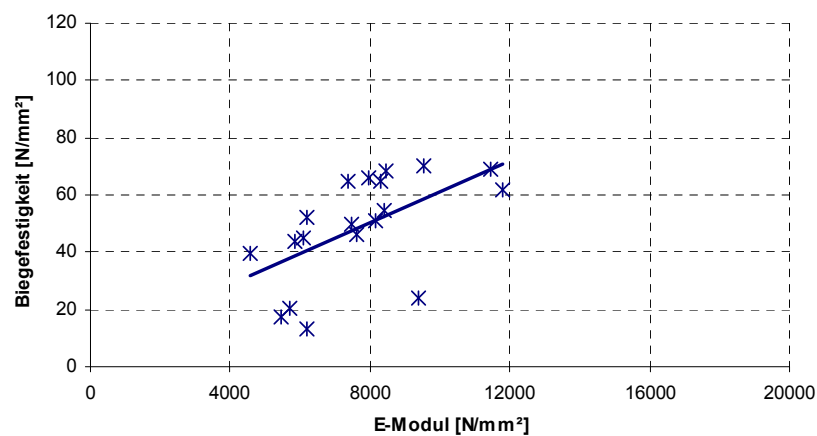


Abb. 150: Zusammenhang von Biegefestigkeit und E-Modul der Kiefernholz der Schadenszone 3, $r_{xy} = 0,58$

Bei Zusammenfassung der Kiefern- und Fichtenprismen wurde eine strenge Korrelation von $r_{xy} = 0,86$ festgestellt. Tab. 22 gibt einige der Ergebnisse wieder, die vollständige Zusammenstellung befindet sich im Anhang in Tab. A-24.

Tab. 22: Verteilungskennwerte der Biegefestigkeit der Prüfprismen in Abhängigkeit vom E-Modul in den Schadenszonen 1 bis 3 für Fichte und Kiefer

Zielgröße σ_{B12} [N/mm²]	Regressionsansatz mit beeinflussender Variable	n [-]	r_{xy} [-]
<u>Schadenszone 1</u>	$\sigma_{B12} = 0,0058 E_{12} + 10,6$	212	0,86
<u>Schadenszone 2</u>	$\sigma_{B12} = 0,0028 E_{12} + 32,4$	21	0,51
<u>Schadenszone 3</u>	$\sigma_{B12} = 0,0058 E_{12} + 2,1$	24	0,64

6.5.3 Zusammenfassung der Ergebnisse der Biegeprüfungen

Die **Biegefestigkeit** wurde bei den **Balken** auf den unregelmäßigen und von losen Bestandteilen gereinigten Querschnitt (realer Querschnitt) bezogen. Vergleicht man die so ermittelten Werte mit anderen Veröffentlichungen zur Biegefestigkeit von Althölzern, liegen die Ergebnisse nahe beieinander (Tab. 23), obwohl geschädigte Altholzbalken Eingang in die Untersuchung fanden. Dabei sollten weniger die Absolutwerte der Biegefestigkeit sondern die Streuungskennwerte im Mittelpunkt der Betrachtung stehen. Trotz der Balkenschädigung wurden Variationskoeffizienten erreicht, die nur geringfügig über den Vergleichswerten von ungeschädigtem Altholz liegen.

Tab. 23: Einordnung der ermittelten Verteilungskennwerte der Biegefestigkeit der Balken

Quelle	n [-]	\bar{x} [N/mm ²]	s [N/mm ²]	v [%]
<u>Aktuelle Ergebnisse</u>	<u>27</u>	<u>28,3</u>	<u>10,4</u>	<u>37,0</u>
[Ehlbeck und Görlacher, 1988]	17	24,5	8,5	35,5
[Rug und Seemann, 1988]	20	33,3	5,6	16,7
[Nier, 1994]	46	36,4	12,0	33,0

Der Zusammenhang zwischen **Biegefestigkeit** und **E-Modul** lässt sich auch für geschädigte Balken herstellen. Unter Ansatz des realen Querschnittes ist die Qualität der Ausgleichsgeraden mit der von ungeschädigtem Altholz zu vergleichen, was bei pauschalem Ansatz eines Rechteckquerschnitts nicht möglich war. Tab. 24 beinhaltet eine Zusammenstellung von Altholzfestigkeiten aus Literaturangaben und den Vergleich mit den hier gewonnenen Untersuchungsergebnissen.

Tab. 24: Einordnung der ermittelten Korrelationskennwerte von Biegefestigkeit und E-Modul der Balken

Quelle	r_{xy} [-]	Empirischer Zusammenhang	Bemerkung
<u>Aktuelle Ergebnisse</u>	<u>0,68</u> <u>(0,50)</u>	$\sigma_{B\omega} = 0,0018 \cdot E_{B\omega} + 8,5$ $(\sigma_{B12} = 0,0016 \cdot E_{B12} + 15,2)$	<u>Altholz variierender</u> <u>Schadigungsgrade</u>
[Holz, 1981]	keine Angabe	$\sigma_B = 0,0073 \cdot E_B + 11,5$	150 Jahre altes Altholz, Prismenprüfung
[Blaß et al., 1987]	0,62	$\sigma_B = 0,0047 \cdot E_B + 20,7$	Altholz
[Nier, 1994]	0,79	$\sigma_B = 0,0033 \cdot E_B + 1,8$	256 Jahre altes Bauholz
[Rug und Seemann, 1988]	0,78	$\sigma_B = 0,0037 \cdot E_B + 2,7$	ca. 70 Jahre altes Bauholz

Die in Tab. 24 angegebenen Werte aus der Literatur unterliegen meist keiner Differenzierung von geschädigten und ungeschädigten Bauhölzern. Eine uneingeschränkte Vergleichbarkeit ist zwar nicht möglich, jedoch sind die Daten als Bewertungsbasis hinreichend.

Nach den gewonnen Erkenntnissen führt die Einordnung in **Sortierklassen** zur Verbesserung der Korrelation.

Die Korrelation von **Biegefestigkeit und E-Modul** der **Prismen** gegenüber den Balken hat sich nicht verbessert. Gleichwohl war das Niveau der Biegefestigkeit zu Gunsten der nahezu fehlerfreien Prismen verschoben. Die Korrelationskoeffizienten und die Regressionsdaten der Prismen sind denen der Literatur entnommenen Daten ungeschädigter bzw. geschädigter Hölzer sehr nahe, auch wenn es speziell zu Prismenprüfungen an Altholz wenig verfügbare Daten gibt (Tab. 25). Auch bei den Biegeprismen kann trotz Schädigung von einem linearen Zusammenhang von Biegefestigkeit und E-Modul ausgegangen werden.

Tab. 25: Einordnung der ermittelten Korrelationskennwerte von Biegefestigkeit und E-Modul der Prismen

Quelle	r_{xy} [-]	Empirischer Zusammenhang	Bemerkung
<u>Aktuelles Ergebnis</u>	<u>0,72</u>	$\sigma_B = 0,0054 \cdot E_B + 10,7$	<u>Altholz aller Schadenszonen</u>
[Nier, 1994]	0,73	$\sigma_B = 0,0071 \cdot E_B - 5,8$	256 Jahre altes Nadelholz

Der Schadensübergangsbereich wird durch die Werte der Biegefestigkeit und des E-Moduls gut abgebildet. Die Wertedifferenzen von Schadenszone 1 zu Zone 3 fielen bei den Kiefernprismen geringer aus als bei den Fichtenprüfkörpern. Auch in der stark geschädigten Zone 3 konnte ein linearer Zusammenhang von E-Modul und Biegefestigkeit erkannt werden. Wird die Biegefestigkeit der Prismen auf 100 % gesetzt, so besitzen die Altholzbalken im Vergleich nur eine Biegefestigkeit von rund 41 % bei der Sortierklasse $S_R 7$ und 53 % bei der Sortierklasse $S_R 10$. Der mittlere E-Modul der Balken der Sortierklasse $S_R 7$ beträgt 75 %. In der Sortierklasse $S_R 10$ sind die Werte etwa gleich.

6.6 Schlagbiegeprüfungen

6.6.1 Methodik

Sowohl von Neu- als auch von Altholzbalken wurden Probekörper für die Bruchschlagarbeit mittels Schlagbiegeprüfung nach DIN 52189 gewonnen. Zur Ermittlung der Bruchschlagarbeit kam ein Pendelschlagwerk zum Einsatz, das die Bestimmung der benötigten Schlagarbeit ermöglichte. Die klimatisierten Proben mit den Abmessungen von 2 x 2 x 30 [cm] wurden so an die Widerlager angelegt, dass der Sollbruch der Tangentialfläche eintrat. Im Anschluss wurde das Bruchbild dokumentiert. Die Berechnung der Bruchschlagfestigkeit und die Umrechnung auf $\omega = 12 \%$ erfolgte in Anlehnung an TGL 25106/10 nach der im Anhang enthaltenen Gl. A-31 bzw. Gl. A-32.



Abb. 151: Pendelschlagwerk zur Durchführung der Untersuchungen

6.6.2 Messergebnisse und Auswertung

6.6.2.1 Kennwerte

Die Verteilung des Feuchtegehaltes innerhalb der jeweiligen Prüfserie ist dem Anhang, Tab. A-25 und Abb. A-4 zu entnehmen. Ein signifikanter Unterschied der Feuchtegehalte nach Klimalagerung der ungeschädigten Althölzer zu den Neuhölzern konnte nicht festgestellt werden. Der Feuchtegehalt der geschädigten Altholzproben lag jedoch bei durchschnittlich 7 % (Fichte) und 12 % (Kiefer) unter dem der Neuhölzer.

Der Mittelwert der Rohdichte von $0,47 \text{ g/cm}^3$ der ungeschädigten Fichtenhölzer lag um $0,02 \text{ g/cm}^3$ über dem Wert der Fichten-Neuhölzer. Die Rohdichte der Kiefern-Neuhölzer betrug $0,46 \text{ g/cm}^3$, die der geschädigten Kiefernholz war mit $0,40 \text{ g/cm}^3$ deutlich geringer bei größerer Streuung.

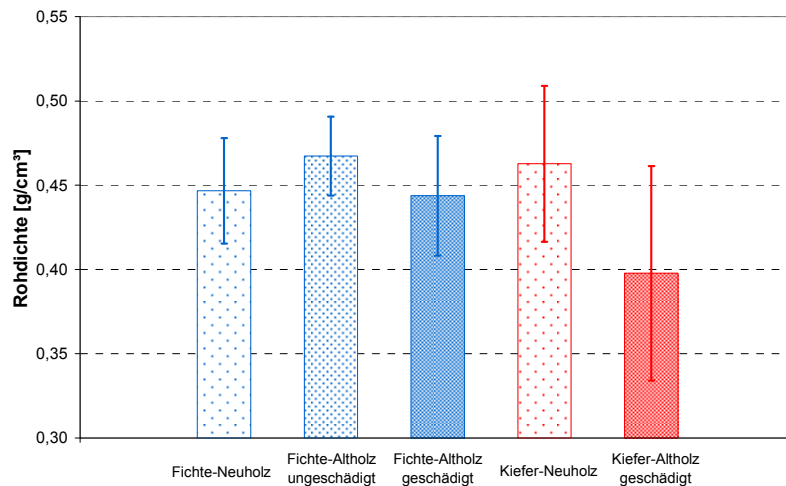


Abb. 152: Rohdichteverteilung der Schlagbiegeprismen innerhalb der Prüfkategorien

6.6.2.2 Schlagbiegefestigkeit

Der bekannte Umstand der hohen Streuung der Ergebnisse bei dieser Festigkeitsprüfung konnte bestätigt werden, dazu Tab. A-27 im Anhang. Besonders stark variierten die geschädigten Kiefernholzer, deren hohe Rohdichtevervariabilität den Variationskoeffizienten zusätzlich beeinflusste. Die durchschnittliche Bruchschlagarbeit bei den ungeschädigten Fichten-Althölzern lag deutlich unter der der Fichten-Neuhölzer, obwohl die Rohdichte ein die Bruchschlagarbeit erhöhenden Aspekt darstellt (Abb. 153).

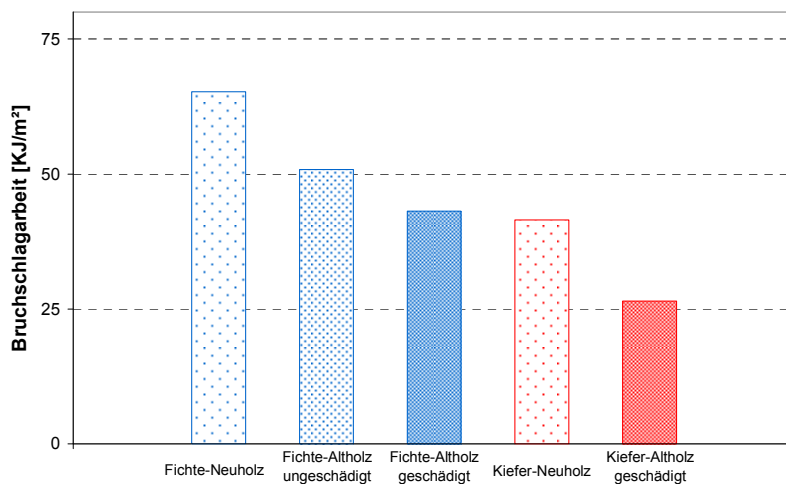


Abb. 153: Bruchschlagarbeit der Prismen innerhalb der Prüfkategorie

Es wurde untersucht, ob ein Zusammenhang der Bruchschlagarbeit der ungeschädigten und geschädigten Prüfkörper zur Rohdichte hergestellt werden kann. Der Korrelationskoeffizient war für die geschädigten Fichtenholzer etwas geringer mit 0,51 als für die Neuhölzer mit 0,68. Der Zusammenhang war jedoch erkennbar. Die Untersuchungen der neuen und der geschädigten Kiefernholzer ergaben ebenso einen Zusammenhang (Abb. 154, Abb. 155). Die Zusammenstellung in Tab. A-28 im Anhang belegt die Abhängigkeit der steigenden Bruchschlagarbeit mit zunehmender Rohdichte.

Für die ungeschädigten Fichten-Althölzer konnte kein Zusammenhang ermittelt werden. Bereits bei der Gegenüberstellung der Bruchschlagarbeit der Prüfkategorien waren die

ungeschädigten Fichten-Althölzer wegen ihrer niedrigen Werte in Bezug auf die Rohdichte-
verteilung aufgefallen.

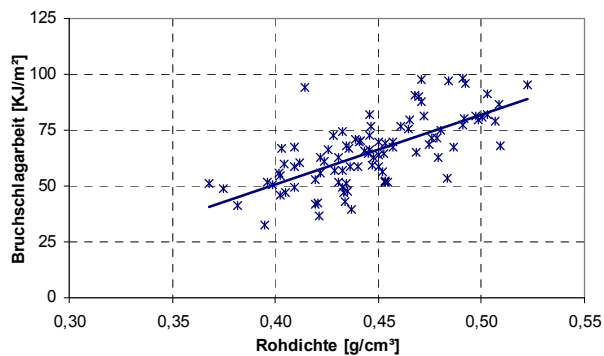


Abb. 154: Zusammenhang von Bruchschlagarbeit und Rohdichte des Fichten-Neuholzes, $r_{xy} = 0,68$

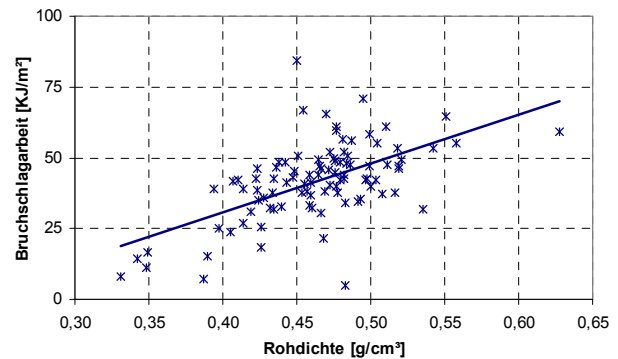


Abb. 155: Zusammenhang von Bruchschlagarbeit und Rohdichte des Kiefern-Neuholzes, $r_{xy} = 0,58$

6.6.2.3 Schadensübergangsbereich

Nach Zuordnung zu den Bereichen des Schadensüberganges wurde zunächst die Rohdichte in den drei Schadenszonen ausgewertet (Abb. 156). Die Hölzer, die der Zone 3 zugeordnet wurden, zeigten kaum einen Unterschied zum Übergangsbereich zwischen geschädigtem und ungeschädigtem Holz. Die zugehörigen Verteilungskennwerte sind im Anhang aufgeführt.

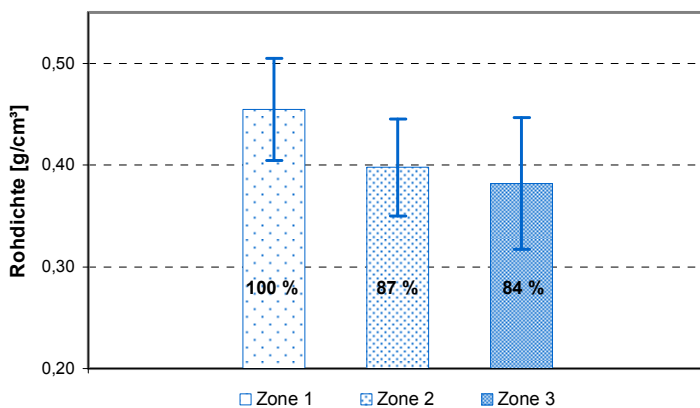


Abb. 156: Rohdichte innerhalb der definierten Schadenszonen der Schlagbiegeprismen

Das Ergebnis der Untersuchung der Bruchschlagarbeit ist in Abb. 157 dargestellt. Die Rohdichte reduzierte sich auf 87 % bzw. 84 % im Vergleich zum ungeschädigten Holz. Die Schlagbiegefestigkeit sank jedoch auf 50 % bzw. 25 % des Referenzwertes. Aufgrund dessen wurde eine weitere Differenzierung nur für die geschädigten Althölzer vorgenommen.

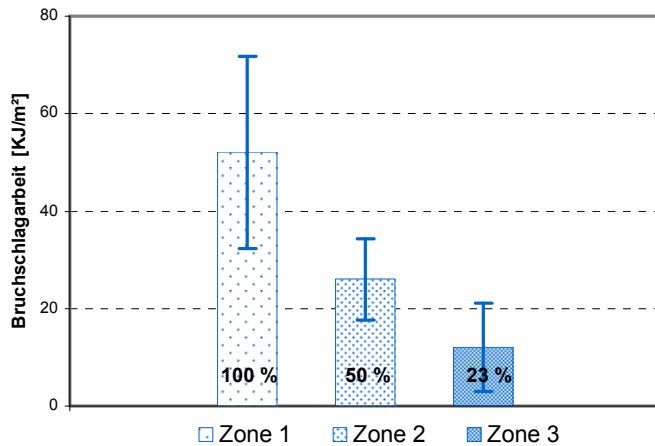


Abb. 157: Bruchschlagarbeit aller geprüften Prismen unter Berücksichtigung der Schadenszonen

Auch wenn für die Fichten-Althölzer in den Zonen 2 und 3 nur sehr wenige Proben zur Verfügung standen, so ließ sich zumindest ein Trend abschätzen, der die in Abb. 157 wiedergegebenen Verhältnisse für die jeweilige Holzart bestätigte. In Abb. 158 ist ein stärkerer Einfluss der Schädigung auf die Bruchschlagarbeit der Kiefer zu erkennen, wohingegen die Reduzierung der Bruchschlagarbeit der Fichte in Schadenszone 3 geringer war. Tab. A-30 im Anhang gibt die Verteilungskennwerte der Bruchschlagarbeit der Prüfkategorien wieder und verdeutlicht, dass aufgrund der sehr großen Streuung für die Ermittlung repräsentativer Kennwerte eine ausreichend hohe Anzahl an Prüfkörpern notwendig ist.

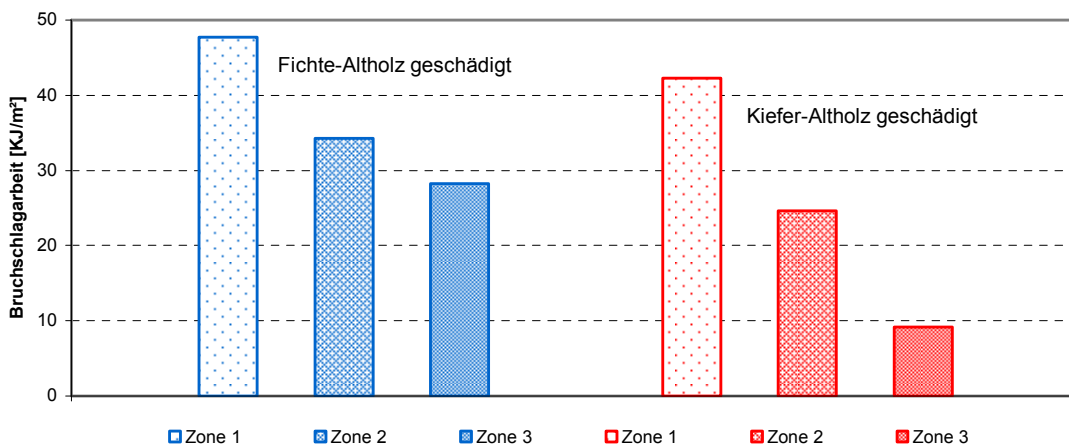


Abb. 158: Bruchschlagarbeit der Prismen der geschädigten Hölzer unter Berücksichtigung der Schadenszonen

Zur Ermittlung des Zusammenhangs zwischen Rohdichte und Bruchschlagarbeit wurde aufgrund der Probekörperanzahl nur das geschädigte Kiefernholz herangezogen. Der dargestellte Zusammenhang in Abb. 159 für die Schadenszonen 1 bis 3 lässt sich prinzipiell unter Beachtung der Anzahl der Datensätze und der Streuung ablesen.

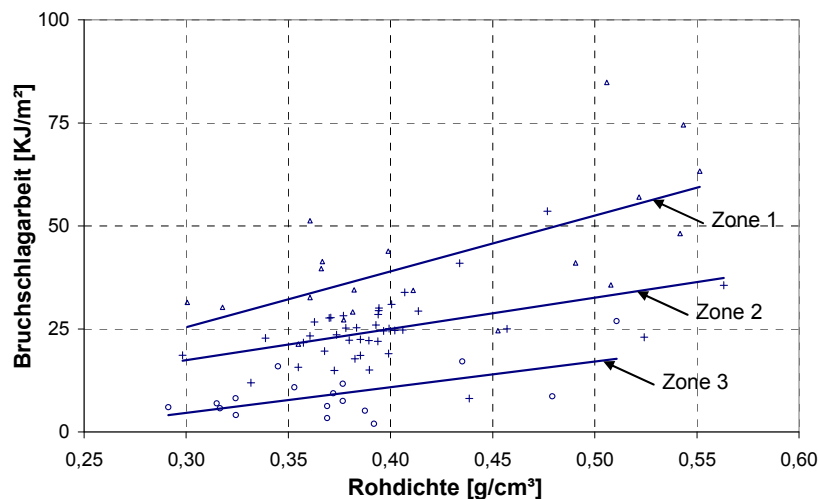


Abb. 159: Zusammenhang von Bruchschlagarbeit und Rohdichte des geschädigten Kiefernholzes, bei jedoch starker Streuung; $r_{xyZ1} = 0,66$, $r_{xyZ2} = 0,45$, $r_{xyZ3} = 0,59$; $\omega = 12\%$

6.6.3 Zusammenfassung der Ergebnisse der Schlagbiegeprüfungen

Obleich die Streuung der Werte der Bruchschlagarbeit hoch ist, ließen sich Trends feststellen. Sowohl bei den geprüften Neu- als auch den geschädigten Althölzern bestand eine mittlere lineare Abhängigkeit der Höhe der Bruchschlagarbeit von der **Rohdichte**. Für die ungeschädigten Fichten-Althölzer konnte keine Korrelation ermittelt werden. Auffällig war, dass trotz höherer Rohdichte die Bruchschlagarbeit der Fichten-Althölzer im Vergleich zu den Fichten-Neuhölzern deutlich reduziert war, so dass sich die in [Weimar, 2000] dargestellten Verhältnisse zumindest für das Fichtenholz bestätigten. Dieser Prüfkategorie lagen 70 Datensätze von 2 Balken unterschiedlicher Herkunft zugrunde. Es kann in Anlehnung an [Hoferichter und Wehle, 1993] vermutet werden, dass mit zunehmendem Alter des Holzes strukturelle Veränderungen einhergehen. Die mit der Oxydation der Zellulose im Zusammenhang stehenden chemischen Um- oder Abbauvorgängen könnten zu einer reduzierten schlagdynamischen Beanspruchbarkeit führen (Erhöhung der Sprödigkeit). Wenn der Bruch in unmittelbarer Nähe der S_1 -Schicht zu suchen ist, wären hier die vermuteten Veränderungen zu finden, die die Bruchschlagarbeit beeinflussen.

Bei Zuordnung der Prüfprismen in die drei **Schadenszonen** wurde deutlich, dass auch bei kaum merklichen Rohdichtedifferenzen die Schlagbiegeprüfung sensibel auf pilzgeschädigtes Holz reagierte. Sie erwies sich damit als Marker für die definierten Bereiche bzw. den Schädigungsgrad.

7 Zusammenfassung der Ergebnisse der Untersuchungen

Die folgend dargestellten Ergebnisse der Untersuchungen stellen einen Auszug aus den gesamten Ergebnisdaten dar und können differenzierter im jeweiligen Kapitel oder der dem Kapitel nachgestellten Zusammenfassung entnommen werden.

Tab. 26: Zusammenfassung der Ergebnisse der Ultraschallecho-Untersuchungen

Zerstörungsfreies Ultraschallechoverfahren	
<u>Kriterium</u>	<u>Ergebnis</u>
- Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Rohdichte	- Schallgeschwindigkeit nimmt mit steigender Rohdichte zu
- Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Feuchtigkeit	- Schallgeschwindigkeit nimmt mit steigendem Feuchtegehalt ab
- Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit vom Querschnitt	- es wurden keine Abhängigkeiten ermittelt, (kaum Splintanteile enthalten)
- Astdetektion	<ul style="list-style-type: none"> - Äste in Schallausbreitungsrichtung werden bei oberflächennaher Lage mit einem Durchmesser >10 mm erkannt - Äste quer zur Schallausbreitungsrichtung werden in Abhängigkeit von der Tiefenlage mit einem Durchmesser >20 mm erkannt
- Rissdetektion	<ul style="list-style-type: none"> - Risse in Schallausbreitungsrichtung (Oberflächenrisse) werden durch Dämpfung bzw. Auslöschung der Oberflächenwellen und gegenüberliegende große Risse durch Ausbleiben des Rückwandsignals erkannt - Risse quer zur Schallausbreitungsrichtung werden in Abhängigkeit der Tiefenlage und der Position des Prüfkopfarrays erkannt
- Pilzschädigungen	<ul style="list-style-type: none"> - geschädigte Bereiche werden durch Ausbleiben des Rückwandechos erkannt - besondere Schädigungsarten verursachen ein Echosignal - der Schadensübergangsbereich wird durch die Laufzeitgruppierung nicht erkannt

Tab. 27: Zusammenfassung der Ergebnisse der Bohrwiderstands-Untersuchungen

Zerstörungsarmes Bohrwiderstandsverfahren	
<u>Kriterium</u>	<u>Ergebnis</u>
- radiale Bohrungen (Prismen)	- deutliche Amplitudenschwankungen bis 100 %
- tangential Bohrungen (Prismen)	- geringe Amplitudenschwankungen bis 40 %
- tangential/radiale Bohrungen (Prismen)	- mittlere Amplitudenschwankungen bis 80 % - größter Bohrwiderstand
- Abhängigkeit des Bohrwiderstandes von der Rohdichte	- Bohrwiderstand nimmt mit steigender Rohdichte zu
- Abhängigkeit des Bohrwiderstandes vom Querschnitt	- Bohrwiderstand nimmt mit größer werdendem Abstand von der Querschnittszone 1 zu
- Äste	- direkte Erkennung auch von Punkstäben
- Bohrtrend	- Einfluss nimmt mit steigender Rohdichte zu - bei Hölzern < 0,50 g/cm ³ Überlagerung mit anatomischen Bedingungen, daher nicht definierbar - Erhöhung des Bohrtrends durch Anbohren von Ästen
- Verlaufen	- Verlaufneigung nimmt mit kleiner werdendem Winkel zwischen Bohrrichtung und Jahringtangente zu - Verlaufneigung nimmt mit größerer Jahringbreite zu - Verlaufneigung nimmt mit abruptem Übergang von Früh- zum Spätholz zu
- Pilzschädigungen	- geschädigte Bereiche werden durch niedrigen Bohrwiderstand erkannt - der Schadensübergangsbereich wird differenziert erkannt

Tab. 28: Zusammenfassung der Ergebnisse der Druckfestigkeits-Untersuchungen

Druckfestigkeit	
<u>Kriterium</u>	<u>Ergebnis</u>
- Abhängigkeit der Druckfestigkeit von der Rohdichte	<ul style="list-style-type: none"> - Druckfestigkeit nimmt sowohl bei ungeschädigtem als auch bei geschädigtem Altholz mit steigender Rohdichte zu - geringe Veränderungen der Rohdichte führen bei geschädigtem Holz zu einem stärkeren Einfluss auf die Festigkeit
- Pilzschädigung	<ul style="list-style-type: none"> - geschädigte Bereiche besitzen eine niedrigere Druckfestigkeit - der Schadensübergangsbereich wird differenziert

Tab. 29: Zusammenfassung der Ergebnisse der Biegefestigkeits- und Elastizitäts-Untersuchungen

Biegefestigkeit und E-Modul	
<u>Kriterium</u>	<u>Ergebnis</u>
- Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Rohdichte	- Biegefestigkeit nimmt sowohl bei ungeschädigtem als auch bei geschädigtem Altholz mit steigender Rohdichte zu
- Pilzschädigung	<ul style="list-style-type: none"> - geschädigte Bereiche besitzen eine niedrigere Biegefestigkeit - der Schadensübergangsbereich wird differenziert (außer E-Modul der Kiefernprismen)
- Verfahren der Aufnahme des realen Querschnitts der geschädigten Balken	<ul style="list-style-type: none"> - trotz Prüfung geschädigter Balken, besteht ein Zusammenhang der Biegefestigkeit und des E-Moduls - Streuung vergleichbar mit Prüfserien ungeschädigter Balken
- Versagensursache der Balken	- überwiegend durch Äste und Astquirle

Tab. 30: Zusammenfassung der Ergebnisse der Schlagbiegefestigkeits-Untersuchungen

Schlagbiegefestigkeit	
<u>Kriterium</u>	<u>Ergebnis</u>
- Abhängigkeit der Bruchschlagarbeit von der Rohdichte	- Bruchschlagarbeit nimmt sowohl bei ungeschädigtem als auch bei geschädigtem Altholz mit steigender Rohdichte zu, jedoch starke Streuung
- Holzalter	- Bruchschlagarbeit der Fichten-Althölzer niedriger im Vergleich zu den Fichten-Neuhölzern
- Pilzschädigung	<ul style="list-style-type: none"> - geschädigte Bereiche besitzen eine niedrigere Schlagbiegefestigkeit - Verfahren reagiert sehr sensibel auf Pilzschädigungen - der Schadensübergangsbereich wird differenziert

8 Kombination der Einzeluntersuchungen und Bewertung

8.1 Prismen

Zu den hier wiedergegebenen statistischen Kenngrößen befinden sich weitere Angaben mit Darstellung der Regressionsgleichungen im Anhang im Kapitel A 2.6.

Regressionen 1. Grades

Die **Druckfestigkeit** wurde in Abhängigkeit zum Bohrwiderstand gestellt und der Zusammenhang ermittelt. Es besteht offenbar eine mittlere bis starke Beziehung zwischen Bohrwiderstand und Druckfestigkeit. Der Korrelationskoeffizient betrug 0,62. Bei Auswahl eines logarithmischen Ansatzes konnte ein Koeffizient von 0,69 erreicht werden.

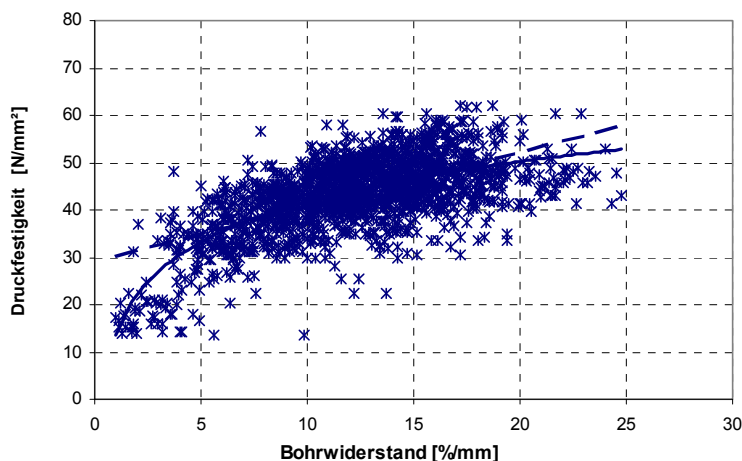


Abb. 160: Zusammenhang von Druckfestigkeit und Bohrwiderstand der Nadelholzprismen, $\omega = 12\%$

Von besonderem Interesse im Hinblick auf die Abschätzung der **Biegefestigkeit** und des **E-Moduls** war die Regression dieser als abhängige Variablen definierten Kennwerte.

Die ermittelten Korrelationskoeffizienten betrugen für die Biegefestigkeit 0,51 und für den E-Modul 0,57. Das bedeutet zwar, dass die beiden Größen korrelieren, die Streuung der erwarteten und der gemessenen Datenpunkte jedoch groß ist.

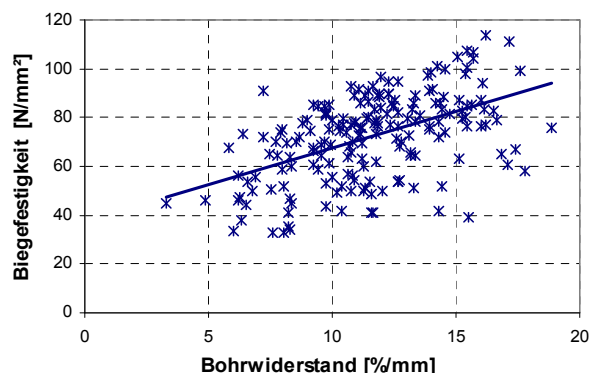


Abb. 161: Zusammenhang von Biegefestigkeit und Bohrwiderstand der Nadelholzprismen, $r_{xy} = 0,51$; $\omega = 12\%$

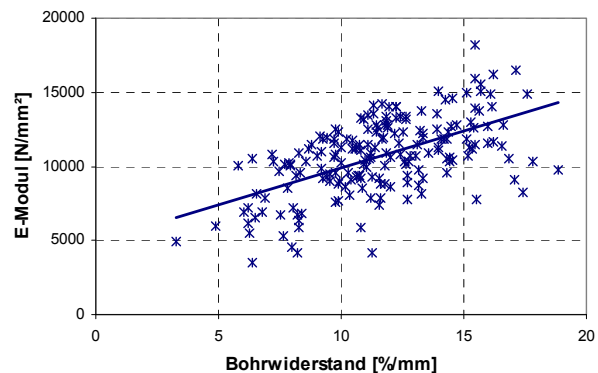


Abb. 162: Zusammenhang von E-Modul und Bohrwiderstand der Nadelholzprismen, $r_{xy} = 0,57$; $\omega = 12\%$

Bruchschlagarbeit und Bohrwiderstand korrelierten deutlich bei Anwendung eines linearen Ansatzes. Bei Einzelbetrachtung der Prüfkategorien ergab sich für das Fichten-Neuholz ein Korrelationskoeffizient von 0,67, für das Kiefern-Neuholz von 0,54 sowie für das geschädigte Kiefernholz von 0,73. Die Steigerung der Darstellung des Zusammenhangs war deutlich. Innerhalb der Kategorien der ungeschädigten Althölzer und der geschädigten Fichtenhölzer

konnte eine Abhängigkeit nicht ermittelt werden. Bei linearer Regression aller geprüften Hölzer war der Zusammenhang weniger deutlich. Bei Ansatz einer logarithmischen Ausgleichsfunktion verbesserten sich die Erwartungswerte zwar etwas, lagen aber immer noch nahe dem Bereich von $r_{xy} \approx 0,50$.

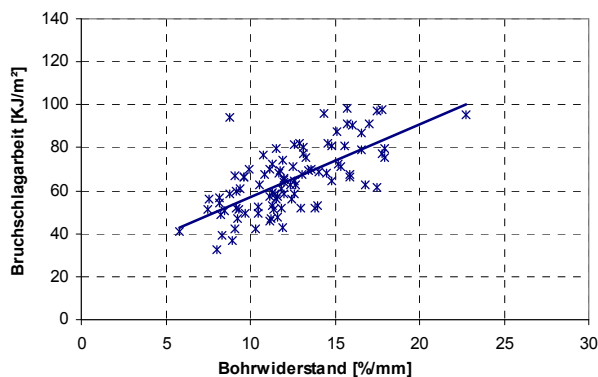


Abb. 163: Zusammenhang von Bruchschlagarbeit und Bohrwiderstand der Fichten-Neuholzprismen, $r_{xy} = 0,67$; $\omega = 12 \%$

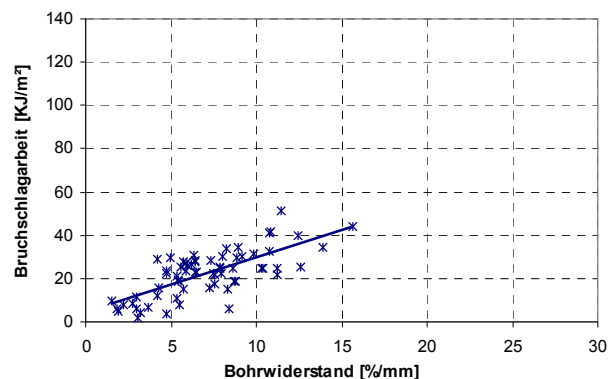


Abb. 164: Zusammenhang von Bruchschlagarbeit und Bohrwiderstand der geschädigten Kiefern-Altholzprismen, $r_{xy} = 0,73$; $\omega = 12 \%$

Auch wenn der Nachweis des Zusammenhanges nicht in allen Prüfkategorien gleichermaßen ausfiel, so lässt sich doch verallgemeinernd feststellen, dass alle hier untersuchten Festigkeitskenngrößen prinzipiell mit dem Bohrwiderstand korrelieren. Die Korrelation basiert u. a. auf den Abhängigkeiten der Festigkeitskennwerte und des Bohrwiderstandes von der Rohdichte. Einfluss hat die unterschiedliche Streuung der jeweiligen Kennwerte, die wiederum im Zusammenhang mit der Prüfkörperanzahl steht. Um mehrere Variable in Abhängigkeit zur Festigkeit zu bringen, wurden multiple Regressionsanalysen durchgeführt.

Multiple Regressionen

Zur Schätzung der Festigkeitskennwerte der Prismen als abhängige Variablen wurden multiple Regressionsanalysen für eine Gerade unter Verwendung der Methode der kleinsten Quadrate durchgeführt. Aus dem Wertarray konnten die Faktoren $m_1, m_2, m_3 \dots$ usw. der unabhängigen Variablen $x_1, x_2, x_3 \dots$ und die Konstante z für die Aufstellung der Geradengleichung der allgemeinen Form $y = m_1x_1 + m_2x_2 + m_3x_3 \dots + z$ genutzt werden. Wenn die Einbeziehung mehrerer unabhängiger Variablen einen Beitrag zur Verbesserung der Schätzwerte der Festigkeiten liefert, wird dies anhand des multiplen Bestimmtheitsmaßes bzw. des multiplen Korrelationskoeffizienten r_m deutlich. Im Falle einer Kollinearität werden die betreffenden unabhängigen redundanten Variablen aus der Betrachtung entfernt. Die Daten wurden auf Ausschluss der Normalverteilung geprüft, um die Anwendbarkeit der hier gewählten statistischen Ansätze zu überprüfen.

In den folgenden Tabellen wird mit Angabe der multiplen Regressionsgleichungen nur eine Auswahl der im Anhang vollständig enthaltenen Daten wiedergegeben.

Für die Beschreibung der **Druckfestigkeit** ergaben sich zum Teil deutliche Verbesserungen der Schätzwerte, besonders bei Kiefernholz. Unter Ansatz der in Tab. A-36 im Anhang angegebenen Regressionsgleichung wurde ein Korrelationskoeffizient von 0,87 erreicht. Die geschädigten und ungeschädigten Althölzer wiesen erwartungsgemäß die größeren Streuungen auf.

Tab. 31: Ergebnisse der multiplen Regression der Bohrwiderstandsprismen für die Druckfestigkeit

<u>abhängige Variable:</u> σ_{D12} [g/cm ³]
unabhängige Variablen: ω [Feuchtegehalt in %]; ρ_{12} [Rohdichte in g/cm ³]; I_{BW} [Bohrwiderstand in %/mm]
alle Nadelholzprismen: $\sigma_{D12} = 0,68 \omega + 98,9 \rho_{12} + 0,47 I_{BW} - 14,1$ $n = 1.579$, $r_m = 0,77$ (Vergleich: $r_{xy1.Grades} = 0,62 / 0,69$)
Fichte: $\sigma_{D12} = 0,90 \omega + 100,9 \rho_{12} + 0,05 I_{BW} - 10,4$ $n = 902$, $r_m = 0,61$
Kiefer: $\sigma_{D12} = 0,01 \omega + 106,0 \rho_{12} - 0,43 I_{BW} - 11,2$ $n = 677$, $r_m = 0,87$

Ein Zusammenhang von **Biegefestigkeit** und **E-Modul** vom Feuchtegehalt, von der Rohdichte und von dem Bohrwiderstand bestand nach durchgeführter Untersuchung. Eine Verbesserung der Erwartungswerte für das Nadelholz insgesamt konnte nicht ermittelt werden. Wurde allerdings nach den Holzarten unterschieden, waren engere Korrelationen zu erwarten. Die Korrelationskoeffizienten erreichten Werte von 0,70 des E-Moduls bei Kiefern-Neuholz. Ausgenommen davon war die Biegefestigkeit der geprüften Fichte, bei der sich der Zusammenhang etwas verschlechterte.

Tab. 32: Ergebnisse der multiplen Regression der Bohrwiderstandsprismen für die Biegefestigkeit und den E-Modul

<u>abhängige Variable:</u> σ_{B12} [g/cm ³]
unabhängige Variablen: ω [Feuchtegehalt in %]; ρ_{12} [Rohdichte in g/cm ³]; I_{BW} [Bohrwiderstand in %/mm]
alle Nadelholzprismen: $\sigma_{B12} = 1,78 \omega + 124,2 \rho_{12} + 1,40 I_{BW} - 19,7$ $n = 646$, $r_m = 0,51$ (Vergleich: $r_{xy1.Grades} = 0,51$)
<u>abhängige Variable:</u> E_{12} [g/cm ³]
unabhängige Variablen: ω [Feuchtegehalt in %]; ρ_{12} [Rohdichte in g/cm ³]; I_{BW} [Bohrwiderstand in %/mm]
alle Nadelholzprismen: $E_{12} = 176,1 \omega + 13.097 \rho_{12} + 300,5 I_{BW} - 584$ $n = 646$, $r_m = 0,56$ (Vergleich: $r_{xy1.Grades} = 0,57$)

Die Streuung der Ergebnisse der **Schlagbiegeprüfungen** wurde bei Ansatz der multiplen Regression verringert. Die multiplen Korrelationskoeffizienten in den meisten Prüfkategorien wurden verbessert. Die maßgebende Einflussgröße war die Rohdichte der Prüfkörper.

Tab. 33: Ergebnisse der multiplen Regression der Bohrwiderstandsprismen für die Schlagbiegefestigkeit

<u>abhängige Variable:</u> w_{12} [kJ/m ²]
unabhängige Variablen: ω [Feuchtegehalt in %]; ρ_{12} [Rohdichte in g/cm ³]; I_{BW} [Bohrwiderstand in %/mm]
alle Nadelholzprismen: $w_{12} = 3,80 \omega + 160,4 \rho_{12} + 1,76 I_{BW} - 88,2$ $n = 700$, $r_m = 0,69$

8.2 Balken

8.2.1 Ultraschallecho

Regressionen 1. Grades

Die Ultraschallechomessungen wurden an Balken durchgeführt, die teilweise der Prismengewinnung dienten. Auf dieser Grundlage wurden die in der Ultraschallprüfachse liegenden Prismen zusammengefasst und deren Festigkeitskenngrößen in Beziehung zur Schallgeschwindigkeit gesetzt.

Das Spektrum der zur Verfügung stehenden Datensätze der **Druckfestigkeit** war etwas umfangreicher als das für die **Schlagbiegeprüfungen**. Die Regressionsansätze führten zu dem Ergebnis, dass eine Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Druckfestigkeit sowie der Bruchschlagarbeit nicht besteht. Nach Lage der Datenpunkte war ein Trend mit negativem Anstieg erkennbar (Abb. A-5 bis Abb. A-8 im Anhang), jedoch konnte aus dem Verlauf der möglichen Ausgleichsgeraden abgeleitet werden, dass der logische Zusammenhang, der an mehreren Fakten in den jeweiligen Abschnitten auszumachen ist, nicht gegeben war. Die Ultraschalldaten stammen von Balken, die ein entsprechendes Feuchtigkeitsspektrum nach Klimalagerung aufwiesen. Nach den ermittelten Ergebnissen in Kapitel 6.2.2.4 sank die Schallgeschwindigkeit mit zunehmender Feuchtigkeit, so dass der Einfluss der Feuchtigkeit den der Rohdichte deutlich überlagerte und zu einer Scheinkorrelation führte. Die Überprüfung der **Biegefestigkeit und des E-Moduls** auf deren Abhängigkeit von der Schallgeschwindigkeit erfolgte mit dem gleichen Ergebnis.

Multiple Regressionen

Für die Ultraschallechomessungen wurden multiple Regressionsanalysen mit dem Ziel durchgeführt, die Einflussgrößen Holzart, Feuchtigkeit und Rohdichte zu kombinieren und damit die Vorhersage für die zu erwartende Schallgeschwindigkeit zu verbessern. Bei den Balken, bei denen es Messungen mit unterschiedlichen Prüffrequenzen gab, wurde auch die Frequenz als unabhängige Variable einbezogen.

Ein Unterschied zwischen den Holzarten bestand nach den Ergebnissen in Kapitel 6.2.2.2, so dass die Analyse nach den Prüfkategorien vorgenommen wurde.

Zur Absicherung der untersuchten Stichprobe und zur Bestätigung des Modellansatzes wurden Untersuchungen zur Adäquatheit durchgeführt. Da keine Daten für Variationskoeffizienten bei Wiederholungsmessungen verfügbar waren, wurde erfahrungsgemäß ein Wert von nur $v = 5,0 \%$ angenommen. Nach Variation des Koeffizienten war eine Adäquatheit selbst bei $v = 2 \%$ noch gegeben. Die Berechnungen erfolgten unter Bewertung der Zielgröße für das 5 %-Quantil.

Im Ergebnis konnte eine ganz deutliche Verbesserung bei den Fichten- und Kiefernholzern erreicht werden. Korrelationskoeffizienten von $r_m = 0,94$ bzw. $r_m = 0,83$ für das Neuholz belegen einen strengen Zusammenhang (Tab. 34), der für die ausgewerteten Kategorien und zugrunde gelegten Kennwertbereiche Gültigkeit besitzt. In die Auswertung innerhalb der Kategorien wurden nur Stichproben mit einer Anzahl von $n > 40$ Datensätzen aufgenommen, so dass Daten zu ungeschädigten und geschädigten Althölzern nicht aufgeführt wurden, auch wenn dabei teilweise starke Korrelationen ermittelt werden konnten.

Es bestätigte sich, dass die Schallgeschwindigkeit in starker Abhängigkeit von den anatomisch-physikalischen Eigenschaften der Holzarten steht, also nicht nur eine Funktion der unterschiedlichen Rohdichte allein ist.

Anhand der strengen Korrelation der geprüften Lärchenbalken wurde deutlich, dass der Einfluss der Frequenz auf die Schallgeschwindigkeit unter den hier angewandten Methoden gering ist.

Tab. 34: Ergebnisse der multiplen Regression der Balken für die Schallgeschwindigkeit

abhängige Variable: v_{T-II} [m/s] unabhängige Variablen: ρ_{12} [Rohdichte in g/cm³]; ω [Feuchtegehalt in %]; f [Frequenz in kHz]
alle Nadelholzbalken (55, 35, 30, 25 kHz) $v_{T-II} = 427,4 \rho_{12} - 6,26 \omega - 4,61 f + 1.294$ $n = 244, r_m = 0,65, F_{Tab.} = 2,46 > F_{exp.} = 2,44 \rightarrow$ Adäquatheit $f_{5\%}$
Fichten-Neuholz (55 kHz) $v_{T-II} = 94,3 \rho_{12} - 8,49 \omega + 1.174$ $n = 49, r_m = 0,94, F_{Tab.} = 2,70 > F_{exp.} = 1,03 \rightarrow$ Adäquatheit $f_{5\%}$
Kiefern-Neuholz (55 kHz) $v_{T-II} = 1.339 \rho_{12} - 9,53 \omega + 421,1$ $n = 41, r_m = 0,83, F_{Tab.} = 2,86 > F_{exp.} = 0,10 \rightarrow$ Adäquatheit $f_{5\%}$
Lärchen-Neuholz (55 kHz, 35 kHz) $v_{T-II} = 710,2 \rho_{12} - 13,50 \omega - 2,33 f + 1.124$ $n = 50, r_m = 0,92, F_{Tab.} = 2,58 > F_{exp.} = 0,12 \rightarrow$ Adäquatheit $f_{5\%}$

8.2.2 Bohrwiderstand

Regressionen 1. Grades

Zu den hier wiedergegebenen statistischen Kenngrößen befinden sich weitere Angaben mit Darstellung der Regressionsgleichungen im Anhang in Tab. A-35.

Das Verhältnis der Werte des Bohrwiderstandes und der **Biegefestigkeit** zueinander ist in Abb. 165 dargestellt. Der Korrelationskoeffizient von 0,51 wies auf eine mäßige Abhängigkeit hin. Die Streuung der Einzelwerte um die Ausgleichsgerade war recht hoch. Ein bestimmender Parameter war hierbei wieder die Rohdichte, deren Einfluss auf die beiden Kenngrößen bereits dargestellt wurde.

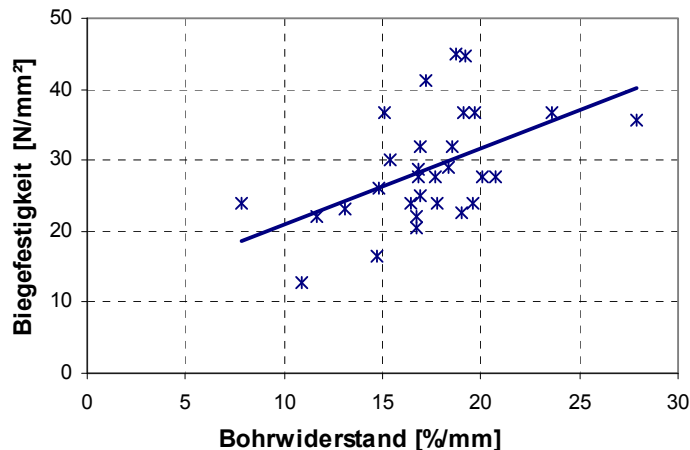


Abb. 165: Zusammenhang von Biegefestigkeit und Bohrwiderstand der Balken, $r_{xy} = 0,51$; $\omega = 12 \%$

Für den **E-Modul** konnte kein Zusammenhang ermittelt werden.

Multiple Regressionen

Von besonderem Interesse im Zusammenhang mit der Durchführung einer multiplen Regressionsanalyse war die Bestimmung der Biegefestigkeit der Balken, die ein wesentliches Ziel der Abschätzung der Tragfähigkeit geschädigter Hölzer ist. Unter baupraktischen Aspekten kann davon ausgegangen werden, dass eine manuelle Nachsortierung, wie im Kapitel 6.1.3 beschrieben, erfolgen muss. Für die Durchführung des Adäquatheitstests wurden statistisch auswertbare neutrale Daten für Altholz benötigt und für die Biegefestigkeit ein Variationskoeffizient von 15,0 % in Ansatz gebracht. Diese Annahme deckt sich beispielsweise mit Angaben in der TGL 33135. Die Berechnungen erfolgten unter Bewertung der Zielgröße für das 5%-Quantil.

Ausgehend von einer einsehbaren Balkenkonstruktion konnten durch visuelle Nachsortierung insbesondere Ästigkeit, Risse und Faserneigung und durch kleinere Probenentnahmen Rohdichte und Feuchtegehalt ermittelt werden. Bei der Ermittlung des Bohrwiderstandes können gleichzeitig Schadens- und ggf. Querschnittsdaten abgelesen werden.

Im Ergebnis der multiplen Regressionsanalyse mit den unabhängigen Variablen:

- ω [Feuchtegehalt in %],
- I_{BW} [Bohrwiderstand in %/mm],
- Qz [Querschnittszone],
- ρ_{12} [Rohdichte in g/cm³] und
- A [Ästigkeit der Zugseite]

konnte festgestellt werden, dass ein deutlicher Zusammenhang dieser unabhängigen Variablen zur Biegefestigkeit besteht.

Obgleich die Balken unterschiedliche Schädigungsgrade aufwiesen und auch in ihrer Herkunft sehr stark differierten, konnten Korrelationskoeffizienten im Bereich von $0,52 \leq r_m \leq 0,76$ ermittelt werden. Grundlegend bleibt dabei, dass der Erwartungswert der Biegefestigkeit die Ermittlung des realen Querschnitts voraussetzt. Ähnliche Resultate wurden für den E-Modul ermittelt. Die Tab. 35 und die Tab. 36 stellen die Ergebnisse für die Nadelhölzer zusammenfassend dar. Die vollständigen Angaben der multiplen Regression sind im Anhang enthalten.

Tab. 35: Ergebnisse der multiplen Regression der Balken für die Biegefestigkeit

abhängige Variable: σ_{B12} [g/cm ³] unabhängige Variablen: ω [Feuchtegehalt in %]; I_{BW} [Bohrwiderstand in %/mm]; Qz [Querschnittszone]; ρ_{12} [Rohdichte in g/cm ³]; A [Ästigkeit der Zugseite]
alle Nadelholzbalken S_R 10: $\sigma_{B12} = -0,13 \omega + 0,41 I_{BW} - 0,29 Qz + 152,3 \rho_{12} - 63,9 A - 33,7$ S_R 7 : $\sigma_{B12} = -0,13 \omega + 0,41 I_{BW} - 0,29 Qz + 152,3 \rho_{12} - 63,9 A - 23,0$ $n = 229$ (Messungen an 21 Balken), $r_m = 0,74$ $F_{Tab.} = 2,01 > F_{exp.} = 1,90 \rightarrow$ Adäquatheit $f_{5\%}$

Tab. 36: Ergebnisse der multiplen Regression der Balken für den E-Modul

abhängige Variable: E_{12} [g/cm ³] unabhängige Variablen: ω [Feuchtegehalt in %]; I_{BW} [Bohrwiderstand in %/mm]; Qz [Querschnittszone]; ρ_{12} [Rohdichte in g/cm ³]; A [Ästigkeit der Zugseite]
alle Nadelholzbalken S_R 10: $E_{12} = -56,4 \omega + 110,0 I_{BW} - 53,4 Qz + 16.070 \rho_{12} + 1.217 A - 1.152,3$ S_R 7 : $E_{12} = -56,4 \omega + 110,0 I_{BW} - 53,4 Qz + 16.070 \rho_{12} + 1.217 A + 561,6$ $n = 229$ (Messungen an 21 Balken), $r_m = 0,61$ $F_{Tab.} = 2,01 > F_{exp.} = 1,72 \rightarrow$ Adäquatheit $f_{5\%}$

Bei wirtschaftlich oder bauhistorisch bedeutsamen Objekten können Probelastungen im Rahmen einer Tragwerksanalyse durchgeführt und der statische E-Modul ermittelt werden. Durch eine temporäre Konstruktion (Lastrahmen) wird über Belastung in verschiedenen Stufen und dem anschließenden Entlasten der betreffenden Bauteile die Verformung (Durchbiegung) ermittelt und daraus der E-Modul unter Rückrechnung der Auflagereindrückung bestimmt. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, aus dem dynamischen auf den statischen E-Modul zu schließen.

Setzt man die vorherige Ermittlung des E-Moduls voraus und lässt diesen in die multiple Regressionsuntersuchungen einfließen, besteht die Gefahr einer Scheinkorrelation, da nach bekannten Verhältnissen die Biegefestigkeit eine direkte lineare Abhängigkeit zum E-Modul besitzt und eine starke Wichtung auftritt, die die anderen unabhängigen Faktoren dominiert. Eine idealisierte Gerade, auf der alle Messwerte liegen, wird bei Holz so gut wie nie erreicht. Im Fall des geprüften Kollektivs war die Zusammensetzung inhomogen. Vergleicht man die Korrelationskoeffizienten, die sich aus 6.5.2.1.3 ergeben, so besteht zwar ein linearer Zusammenhang, die zugrunde liegenden Messergebnisse streuten jedoch recht stark aufgrund der variierenden Schäden ($r_{xy} = 0,50$ für $\omega = 12\%$, Tab. 20). Eine Beeinflussung ist anzunehmen, jedoch deren Dominanz allein aus dem Zusammenhang zwischen Biegefestigkeit und E-Modul demnach auszuschließen.

Soweit der E-Modul aus flankierenden Maßnahmen ermittelt und in die multiple Regression einbezogen wurde, war eine Verbesserung der Vorhersage der Biegespannung bis zu $r_m = 0,96$ für die geprüften Nadelholzbalken (Tab. 37) möglich.

Das deutliche Ergebnis belegt eine starke Abhängigkeit der Abschätzung der Biegespannung von geschädigtem Altholz vom E-Modul. Auch wenn vergleichsweise wenig Balken geprüft werden konnten und sich die Gültigkeit errechneter Werte auf die jeweilige Spanne der zugrunde liegenden Kennwerte bezieht, so ist doch das erhebliche Potenzial der Kombination von Einzeluntersuchungen bei der Bewertung bestehender Holzkonstruktionen zu erkennen.

Tab. 37: Ergebnisse der multiplen Regression der Balken für die Biegefestigkeit bei bekanntem E-Modul

<p><u>abhängige Variable: σ_{B12} [g/cm³]</u></p> <p>unabhängige Variablen: E_{12} [E-Modul in N/mm²]; ω [Feuchtegehalt in %]; I_{BW} [Bohrwiderstand in %/mm]; Qz [Querschnittszone]; ρ_{12} [Rohdichte in g/cm³]; A [Ästigkeit der Zugseite]; S_R [Sortierklasse]</p>
<p>alle Nadelholzbalken</p> <p>S_R 10: $\sigma_{B12} = 0,0034 E_{12} + 0,07 \omega + 0,04 I_{BW} - 0,11 Qz + 96,9 \rho_{12} - 68,1 A - 24,9$ S_R 7 : $\sigma_{B12} = 0,0034 E_{12} + 0,07 \omega + 0,04 I_{BW} - 0,11 Qz + 96,9 \rho_{12} - 68,1 A - 29,7$ $n = 229$ (Messungen an 21 Balken), $r_m = 0,96$ $F_{Tab.} = 1,94 > F_{exp.} = 0,36 \rightarrow$ Adäquatheit $f_{5\%}$; innerhalb 3σ-Grenzen</p>

9 Schlussbetrachtung

9.1 Praktische Umsetzung der Ergebnisse

9.1.1 Hinweise zur Bemessung

Die Bewertung bestehender Holzkonstruktionen erfordert die Einstufung des Bauteils in eine Festigkeitsklasse, die aus der Sortierklasse resultiert, in die verschiedene Sortierkriterien einfließen.

Die Rohdichte kann dabei als Mittler zu einer höheren Einstufung dienen. Dafür sind im Regelfall 10, mindestens 6 Proben je Bauteil zu entnehmen. Die Streuung wird unter Annahme eines Variationskoeffizienten berücksichtigt und eine resultierende Rohdichte von

$$\rho_{k(5\%)} = \rho_{mean} \cdot (1 - 1,645 \cdot v_{\rho}) \quad \text{Gl. 9-1}$$

angesetzt [Lißner und Rug, 2005]. Die sich aus der visuellen Sortierung ergebende Klasse S 7, S 10 oder S 13 entspricht nach DIN-EN 1912 einer Festigkeitsklasse C 16, C 24 oder C 30. Deren charakteristische Festigkeitswerte sind Tabelle F.5 der DIN 1052 (Auszug in Tab. 38) zu entnehmen.

Tab. 38: Rechenwerte charakteristischer Festigkeitskennwerte nach DIN 1052, Tab. F.5

Sortierklasse nach DIN 4074	Festigkeitsklasse nach DIN EN 1912, Tabelle 1	Biegung $f_{m,k}$ [N/mm ²]	Rohdichte ρ_k [g/cm ³]
S 7	C 16	16	0,31
S 10	C 24	24	0,35
S 13	C 30	30	0,38

Mit bauaufsichtlicher Einführung der neuen DIN 1052 und deren Bezug auf DIN 1055-100 wurde ein verändertes Sicherheits- und Bemessungskonzept im Zuge europäischer Harmonisierung vorgegeben. Die bis dahin gültigen zulässigen Spannungen sind nun nicht mehr Bestandteil des Entwurfs, der Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken. Der globale Sicherheitsfaktor für die Belastungs- und Widerstandsseite, einschließlich der Belastungsdauer, wurde durch einzelne Teilsicherheitsbeiwerte ersetzt. Die Sicherheitsbetrachtung basiert auf der getrennten Betrachtung für die Einwirkungen und das Material. Für den Baustoff sind damit im Zuge eines statischen Nachweises charakteristische Werte für dessen Eigenschaften sowie modifizierende Faktoren (k_{mod} -Werte) und ein Teilsicherheitsbeiwert (γ_m) anzusetzen. Der γ_m -Wert spiegelt die Sicherheit gegenüber ungünstigen Abweichungen von den charakteristischen Baustoffkennwerten und Unsicherheiten der einfließenden Rechenfaktoren sowie im angenommenen Modell (Geometrie, Tragsicherheit) gegenüber der realen Konstruktion wider. Nach dem Verfahren der Teilsicherheitsbeiwerte sind die Nachweise des Grenzzustandes der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit nach DIN 1055-100 zu führen. Für die Baustoffseite errechnet sich der Bemessungswert ($f_{m,d}$) des Holzbauteiles unter Berücksichtigung o. g. Faktoren:

$$f_{m,d} = \frac{k_{mod}}{\gamma_m} f_{m,k} \quad \text{Gl. 9-2}$$

Beispielsweise bemisst sich bei Ansatz der Nutzungsklasse 2 (überdachte offene Bauwerke, 20 °C, 85 % relative Luftfeuchte wird nur einige Wochen im Jahr überschritten) nach Gl. 9-2 $f_{m,d}$ wie folgt:

$$f_{m,d} = \frac{0,6}{1,3} f_{m,k} = 0,461 f_{m,k}, \text{ so dass sich in den Festigkeitsklassen die in Tab. 39}$$

angegebenen Bemessungswerte ergeben.

Tab. 39: Bemessungswerte für den Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit

	Biegefestigkeit $f_{m,d}$ [N/mm ²]
C 16	7,38
C 24	11,08
C 30	13,85

Wird eine der individuellen Konstruktion angepasste Festigkeitssortierung vorgenommen, so muss eine Zustimmung der Bauaufsichtsbehörden im Einzelfall erfolgen. Es gibt bisher keine bauaufsichtlichen Regelungen zur Einstufung in Festigkeitsklassen als Grundlage statischer Berechnungen von Holztragwerken im Bestand nach DIN 1052.

9.1.2 Praxisanwendung

Nach der hier entwickelten Methode wird eine Nachsortierung von Konstruktionshölzern in Anlehnung an DIN 4074 in modifizierter Form für die geschädigten und ungeschädigten Althölzer durchgeführt. Der wichtigste Schritt bei der Bewertung bestehender Holzkonstruktionen besteht in der Aufnahme der realen Materialkennwerte und Schädigungen. Wesentliche Aufgabe ist demnach die Ermittlung der Sortierklasse, die eine genaue Kenntnis der anatomisch bedingten Holzfehler (Inhomogenitäten, die als Sortierkriterien angegeben werden) voraussetzt.

Bestehen bauhistorische und wirtschaftliche Erfordernisse einer Bewertung verdeckt liegender Hölzer, sind die hier untersuchten zerstörungsfreien und -armen Prüfverfahren gut geeignet.

Nach optischer Einschätzung und Dokumentation der sichtbaren geometrischen und technischen Kennwerte kann mit dem Ultraschallechoverfahren die Aufnahme und Markierung der in 6.2.2 dargestellten und verdeckt liegenden anatomisch bedingten Auffälligkeiten erfolgen. Der Vorteil besteht darin, dass das Verfahren schnell Ergebnisse liefert, die einen Verdacht auf Schädigung gegebenenfalls begründen und detaillierte Prüfungen nach sich ziehen.

Die Astdetektion ist in numerischer Abhängigkeit von der Frequenz und der Schallgeschwindigkeit durchzuführen. Je höher die Frequenz, umso besser können kleinere Inhomogenitäten erkannt werden. Mit steigender Frequenz erhöht sich die Dämpfung, so dass die Lage des Astes im Prüfkörperquerschnitt entscheidend für die Detektion ist. Auffällige Stellen können mit dem Bohrwiderstand verifiziert werden. Durch partielle Öffnung kann die Astdetektion auf der Zugseite des biegebeanspruchten Bauteiles über eine seitliche Ankopplung erfolgen. Unter dem Aspekt der Ermittlung der Ästigkeit kann davon ausgegangen werden, dass eine Einstufung in $S_R 7$ und $S_R 10$ ermöglicht werden kann. Nach 6.2.2.5

sind Äste ab etwa 20 mm erkennbar, so dass die in DIN 4074-1 angegebenen kleinsten Ästigkeiten bei üblichen Bauholzquerschnitten erfasst werden.

Die Bewertung von Schwindrissen mit beispielsweise $R_{zul} \leq 1/2$ für die Klasse S 10 entspricht bei einem Balken 16/20 [cm] 8,0 cm Risstiefe. Mit dem Ultraschallechoverfahren können Risstiefen, die nur wenige Zentimeter betragen, sehr gut erkannt werden (Kapitel 6.2.2.6). Sollen nicht einsehbare Bauteile auf Schäden untersucht werden, ist eine Kalibrierung an ungeschädigter Stelle mit Kenntnis der Lage der Bauteilrückwand erforderlich. Alternativ können ermittelte Kenngrößen errechnet werden, wenn die eingehenden unabhängigen Variablen innerhalb der Versuchsbedingungen liegen.

Die Tiefenlage und Ausdehnung der Sortierkriterien kann nun über die Nutzung der nach Tab. 34 abzuschätzenden Schallgeschwindigkeit überprüft werden. Dafür, wie auch für die weiterführenden Untersuchungen, sind der Feuchtegehalt und die Rohdichte zu ermitteln. Bei Messungen vor Ort sind verschmutzte oder raue Oberflächen zu beachten, da sie den Energieübergang in das Bauteil reduzieren. Eine funktionstüchtige Ankopplung an die Bauteiloberfläche muss sichergestellt sein, um Signale empfangen zu können. Beispielsweise trifft man bei Konstruktionen ab Mitte des 19. Jahrhunderts häufig auf sägeraue Balkenflächen. Das erschwert die Prüfung. Gegebenenfalls muss die Messstelle vorbereitet werden. Auch der Ankopplungsdruck muss wegen der Auswertung der empfangenen Amplituden weitgehend gleichmäßig sein.

Die Spannungsermittlung soll an der Stelle erfolgen, an der ein Versagen auftreten könnte (Sollbruchstelle), so dass die geometrischen Daten an diesem Punkt genau bekannt sein müssen. Gleichzeitig muss für den Ansatz der Spannungsformel nach Tab. 35 bzw. Tab. 37 der Bohrwiderstand und die Querschnittszone erfasst werden. Mit Hilfe des Bohrwiderstandes und der Bohrweganalyse kann damit ein aus den Amplituden ermitteltes Querschnittsprofil aufgestellt werden.

Die Bestimmung des E-Moduls verbessert die Vorhersage der Biegefestigkeit erheblich. Das kann durch eine Probelastung (Biegeversuch im Einbauzustand am Objekt) erfolgen. Wie im Kapitel 4.3 dargestellt, besteht außerdem die Möglichkeit, den statischen E-Modul aus dem dynamischen E-Modul zu ermitteln. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde nicht mit dem dynamischen E-Modul gearbeitet.

Die in den Untersuchungen ermittelten Biegefestigkeitswerte der Balken stellen unter Annahme einer nur geringfügigen Veränderung des Feuchtegehaltes die Vergleichswerte zu den in Tab. 39 angegebenen Werten (Nutzungsklasse 2) in Bezug auf das tatsächliche Versagen dar. Die in den entsprechenden Kapiteln dargestellten Vorhersagen der Festigkeiten sind nicht gleichzusetzen. Die $f_{m,k}$ -Werte nach DIN 1052 rekrutieren sich aus Versuchen unter einheitlichen Versuchsbedingungen und unter Wahrung statistischer Anforderungen und sind der 5%-Quantilwert aus diesen Versuchen. Die ermittelten Biegefestigkeitswerte sind aufgrund der Prüfkörperanzahl von 21 (Basis der multiplen Regression) der in die Auswertung gekommenen Balken statistisch nur unzureichend abgesichert. Unter Beachtung dieses Umstandes wurden die ermittelten Werte mit den Bemessungswerten verglichen. Es muss dabei herausgestellt werden, dass die Gültigkeit der Regressionsanalysen nur im Bereich der ermittelten experimentellen Werte liegt. Darunter und darüber liegende Verhältnisse sind spekulativ, auch wenn in den meisten Fällen eine lineare Regression angesetzt wurde.

Der notwendige Nachweis einer Sortier- oder Festigkeitsklasse kann eine Fragestellung sein, wenn die Schädigungen von vornherein als gering eingestuft werden. Ein Vergleich der Biegefestigkeit der normenkonformen S-Klassen und der Biegefestigkeit mit den in Tab. 37 dargestellten Regressionsgleichungen ergeben die in Tab. 40 wiedergegebenen Faktoren.

Tab. 40: Vergleich der Bemessungswerte mit den Biegefestigkeitswerten aus Tab. 37

	Biegefestigkeit nach DIN 1052 ($f_{m,d}$) [N/mm ²]	Biegefestigkeit der Prüfbalken aus Regressionsgleichung, jedoch nicht 5 %-Quantil min / mittel (σ_{B0}) [N/mm ²]	Faktoren aus $\sigma_B / f_{m,d}$ min / mittel
C 16	7,38	11,0 / 25,3	1,5 / 3,4
C 24	11,08	20,9 / 32,1	1,9 / 2,9

9.2 Zusammenfassung

In der Arbeit wurde gezeigt, dass mit Hilfe der gewählten zerstörungsfreien und -armen Prüfverfahren der Bezug zu festigkeitsrelevanten Parametern hergestellt werden kann.

Insgesamt 58 Nadelholzbalken, zum Teil in Originalabmessung, wurden dokumentiert und geprüft.

Die Dokumentation der untersuchten neuen Kanthölzer sowie der ungeschädigten und geschädigten Altholzbalken konnte mit Hilfe des Verfahrens der Entzerrung und dem Einlesen in ein CAD- System sowie deren dreidimensionale Darstellung realisiert werden. Auch nach der zerstörenden Prüfung der Balken und der Prismenherstellung war es an den erstellten virtuellen Probekörpern möglich, geometrische Daten direkt zu erhalten und Merkmale der Sortierung zu entnehmen.

Die Auswertung der Messergebnisse erfolgte unter Verwendung statistischer Ansätze. Um mehrere unabhängige Variablen einfließen zu lassen, wurden zusätzlich multiple Regressionsanalysen durchgeführt.

Für die Prüfungen an den geschädigten Balken wurde ein Schadensübergangsbereich mit drei Zonen definiert.

Ultraschallecho

Bei den Ultraschallechountersuchungen wurde mit dem Verfahren der Laufzeitgruppierung gearbeitet und dessen gute Eignung für derartige Auswertungen bestätigt.

Es wurde für die Rohdichtespanne der zur Verfügung stehenden Prüfkörper festgestellt, dass die Schallgeschwindigkeit der Transversalwellen von der Rohdichte abhängig ist. Die Schallgeschwindigkeit erhöhte sich mit steigender Rohdichte.

Ein enger Zusammenhang konnte auch bezüglich des Feuchtegehaltes nachgewiesen werden. Unterhalb des Fasersättigungspunktes verringerte sich mit steigendem Feuchtegehalt die Schallgeschwindigkeit.

Messungen über die Querschnittsbreite ergaben keine signifikante Veränderung der Schallgeschwindigkeit.

Nach Durchführung einer multiplen Regressionsanalyse mit der Rohdichte, dem Feuchtegehalt und der Messfrequenz als unabhängigen Variablen wurden sehr gute Korrelationen innerhalb der Holzarten ermittelt, so dass die Schallgeschwindigkeit gut abgeschätzt werden konnte.

Äste, die quer zur Ausbreitungsrichtung verlaufen, waren ab etwa 20 mm erkennbar. Je nach Größe und Lage zu dahinter liegenden Reflektoren traten Abschattungen ein. Deutlichere Abschattungen wurden bei Rissen quer zur Ausbreitungsrichtung festgestellt. Die Rissufer fungierten als Reflexionsebene und wurden dadurch gut abgebildet.

Auch der Rissverlauf konnte bei langen Einzelrissen dargestellt werden. Äste und Risse in Ausbreitungsrichtung führten meist zur Auslöschung der Oberflächenwellen oder des Rückwandechos.

Der Einflussbereich der Oberflächenwellen war bei höheren Feuchtegehalten größer. Die Polarisierung der Prüfköpfe in Faserrichtung initiierte bei den Prüfbalken zusätzlich

Longitudinalwellen, die von seitlichen Begrenzungsflächen reflektiert wurden und das Echobild beeinflussten.

Schädigungen wurden prinzipiell durch Ausbleiben des Echos der Bauteilrückseite detektiert. Übergangsbereiche von intaktem zu geschädigtem Material ließen sich mit der Methodik der Laufzeitgruppierung nicht differenziert abbilden. War der Übergang in Schallausbreitungsrichtung abrupt, wurden die Wellen reflektiert und erzeugten ein Echosignal.

Bohrwiderstand

Die Bohrwidstandsmessungen wurden sowohl an den Prismen als auch an den Balken durchgeführt und die Daten als Bohrwidstandswert je Millimeter vergleichbar skaliert und ausgewertet.

Die durchgeführten Bohrwidstandsuntersuchungen belegen einen Zusammenhang zwischen Bohrwidstand und Rohdichte sowohl für die Prismen als auch für die geprüften Balken.

Die Streuung der Werte der Regressionsanalysen wurde bei Differenzierung der Bohrrichtung (radial, tangential oder tangential/radial) und des durchbohrten Bereiches des Balkenquerschnitts reduziert. Bei den Balkenquerschnitten wiesen die durchbohrten äußeren Bereiche einen höheren Bohrwidstand im Vergleich zu denen mit Juvenilanteil auf. Die Variationskoeffizienten waren deutlich niedriger.

Die Einteilung der Balkenquerschnitte in einzelne Abschnitte verringerte die Streuung der Messwerte. Die Einteilung erfolgt ausgehend von dem Juvenilbereich zum äußeren Querschnitt hin.

Ein Einfluss des Feuchtegehaltes auf den Bohrwidstand innerhalb enger Feuchtigkeitsgrenzen wurde nicht festgestellt.

Pilzschäden an Konstruktionshölzern ließen sich gut durch Verringerung des Bohrwidstandes detektieren. Dabei war es auch möglich, den Bereich des Schadensüberganges differenziert zu betrachten. Ein Vergleich der ermittelten Schadensgrade mit dem realen Probekörper zeigte weitgehende Übereinstimmung. Bemerkenswert bei der Schadensdetektion war, dass der Bohrwidstand bei Schädigungen deutlicher abnahm als die Rohdichte.

Zwischen Bohrwidstand und Rohdichte in den Zonen des Schadensübergangsbereiches bestand ein linearer Zusammenhang.

Festigkeits- und Elastizitätsprüfungen

An Balken und Prismen wurden Festigkeitsuntersuchungen durchgeführt und die Schadensübergangsbereiche gesondert betrachtet.

Die Druckfestigkeit korrelierte sowohl für die Neuhölzer als auch für die ungeschädigten und geschädigten Althölzer mit der Rohdichte. Innerhalb des Schadensübergangsbereiches reduzierte sich die Druckfestigkeit etwas stärker als die Rohdichte. Eine Differenzierung von Schädigungsgraden war möglich.

Die Biegefestigkeit und der Biege-E-Modul wurden an geschädigten Balken in Originalabmessung und an Prismen ermittelt. Diese Festigkeitskennwerte der Prismen geschädigter Althölzer lagen niedriger als die der ungeschädigten Hölzer. Der Zusammenhang von Biegefestigkeit und E-Modul war für alle Prüfkategorien mittelgroß bis stark. Für die einzelnen Holzarten konnte der Schadensübergangsbereich differenziert werden. Die Unterschiede der Schadenszonen waren allerdings nicht so markant wie das bei der Druckfestigkeit festgestellt wurde.

Die Biegefestigkeiten und die E-Moduli der Balken wurden auf den realen Querschnitt bezogen. Dadurch berücksichtigen die geometrischen und statischen Ansätze den individuellen Balkenquerschnitt. Die vorhandenen Pilzschädigungen an den Balken konnten so gut modelliert werden.

Bei den Balken ging das Versagen meist von Ästen bzw. Astquirlen aus. Die Ermittlung der Festigkeitskenngrößen basierte auf der Betrachtung des realen Querschnitts und zu ermittelnden statischen Werten für unregelmäßige Querschnitte. Nach Biegeprüfung wurde ein mittlerer Zusammenhang von Biegefestigkeit und E-Modul für die pilzgeschädigten Balken festgestellt.

Die Ergebnisse der Schlagbiegeprüfungen waren zwar durch stärkere Streuungen als bei den vorgenannten Prüfungen gekennzeichnet, der Zusammenhang von Rohdichte und Bruchschlagarbeit wurde jedoch nachgewiesen. Obwohl die Rohdichteverteilung der Stichprobe eine Unterscheidung der Schadenszonen kaum zulassen würde, war eine Differenzierung mit den Ergebnissen der Schlagbiegeprüfungen gut möglich. Durch das Prüfverfahren konnten Schädigungen sehr differenziert abgebildet werden.

Kombination der Ergebnisse

Die Kombination der ermittelten Festigkeiten mit dem Bohrwiderstand führte zu mittelgroßen bis starken Zusammenhängen. Insbesondere bei der Druckfestigkeit und der Bruchschlagarbeit der ungeschädigten und pilzgeschädigten Hölzer konnte ein deutlicher Zusammenhang nachgewiesen werden. Die Differenzierung von Schadensübergangsbereichen war möglich.

Im Hinblick auf die Einschätzung der Biegefestigkeit bestehender Biegeträger wurden multiple Regressionsanalysen mit modifizierten Sortierkriterien, der Rohdichte, dem Feuchtegehalt, der Querschnittszone, dem Bohrwiderstand und dem E-Modul durchgeführt und ergab einem sehr starken Zusammenhang, der das erhebliche Potenzial der entwickelten Methodik aufzeigt.

9.3 Ausblick

Das Prüfkollektiv der Biegeprüfungen der 27 Balken in Originalabmessungen setzte sich aus verschiedenen Holzarten mit teilweise differierender Herkunft zusammen. Eine statistische Absicherung ist damit noch unzureichend. Die Vervollständigung des Datenbestandes durch weitere Prüfungen gilt als unbedingte Forderung zur praxissicheren Anwendung. Die gewonnenen Daten müssen unter Differenzierung der Holzarten und unter Einbeziehung von Laubholz (insbesondere Eiche) vervollständigt werden.

Neben der Lage der Schädigung und deren Einfluss auf die Biegefestigkeit oder den E-Modul, sind Fragen zur Einschätzung der verbleibenden Tragfähigkeit auch in Bezug auf die Schub- und Druckfestigkeit für die Praxis zu beantworten. Denn gerade die Schädigung von Auflagerpunkten stellt einen sehr oft auftretenden Schadensfall dar.

Der Schädigungseinfluss von holzerstörenden Insekten wurde im Rahmen der Arbeit nicht behandelt, ist jedoch bei der Sanierung von Einfluss. Dabei besitzen Schäden durch Hausbock (*Hylotrupes bajulus* L.) den größten Anteil.

Das Ultraschallechoverfahren ist als relativ neues Verfahren bei der Bewertung von Holzkonstruktionen noch nicht erschöpfend untersucht. Während die Schallgeschwindigkeit als abhängige Variable in der vorliegenden Arbeit herausgestellt wurde, könnte eine auf $\omega = 12$ % standardisierte Schallgeschwindigkeit der Transversalwelle Mittler für weitere im Rahmen von Regressionsanalysen zu ermittelnde Kenngrößen sein. Dabei ist eine Unterscheidung zwischen verschiedenen Holzarten und Querschnitten anzustreben. Erheblicher Bedarf zur weiteren Verbesserung der Auswertealgorithmen wird in der Anwendung verschiedener mathematischer Datenfilter (z. B. Fast Fourier Analyse), der Markerskalierung oder der mehrdimensionalen Zusammenführung bei der Datendarstellung gesehen.

Die auf dem Markt verfügbaren Bohrwiderstandsgeräte sind in ihrer Anzahl überschaubar, unterscheiden sich aber zum Teil in ihrer Funktionsweise bzw. in der gerätespezifischen Auswertung. So sollte eine weiterführende Aufgabe darin bestehen, zu überprüfen, inwieweit sich andere Geräte in das entwickelte Untersuchungsschema einfügen lassen. Verschiedene Gerätetypen erfordern eine Eichbasis, die im Falle der vorliegenden Arbeit mit Sperrholz ($\rho = 0,65 \text{ g/cm}^3$) realisiert wurde. Denkbar wären Materialien, die weniger inhomogen sind, etwa Holzfaserplatten.

Die Erfassung des Bohrtrends führte unter Berücksichtigung des Bohrweges, der Holzart und der Rohdichte zu einer geringeren Streuung der Kennwerte und sollte weiterführend quantifiziert werden.

Durch die eng gesteckten Feuchtigkeitsgrenzen der geprüften Hölzer konnte deren Einfluss auf den Bohrwiderstand nicht nachgewiesen werden. Um endgültige Aussagen treffen zu können, sollten hier ergänzende Untersuchungen angestellt werden.

Literatur- und Quellenverzeichnis

Zitierte Literatur

- Armstrong, H.F.H.; Savory, J. G.: The Influence of Fungal Decay on the Properties of Timber. In: *Holzforschung* 13, 1959, S. 84-89
- Baron, Th.; Hasenstab, A.; Wagenführ, A.: Fäulnis in Brettschichtholz -Bindern einer Brücke mit Ultraschall-Echo lokalisieren. Tagungsband DGZfP-Jahrestagung, St. Gallen, 2008
- Bektha, P.; Niemz, P.; Kucera, L.J.: Untersuchungen einiger Einflussfaktoren auf die Schallausbreitung in Holzwerkstoffen. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 60, 2002, S. 41-45
- Blaß, H.J.; Ehlbeck, J.; Görlacher, R.; Hättich, R.: Karlsruher Forschungen im Ingenieurholzbau 1987. In: *Bauen mit Holz* 89, 1987, Nr. 6, S. 384 ff.
- Blaß, H.J.; Frese, M.: Sortiervverfahren für die kombinierte maschinelle und visuelle Festigkeitssortierung. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2002
- Bodig, J.; Jayne, B. A.: Mechanics of wood and wood composites. Van Nostrand Reinhold Company, New York, Cincinnati, Toronto, 1982
- Booker, R.E.; Sell, J.: The nanostructure of the cell wall of softwoods and its functions in a living tree. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 56, 1998, S. 1-8
- Brischke, C.; Welzbacher, C.R.; Huckfeldt, T.: Influence of fungal decay by different basidiomycetes on the structural integrity of Norway spruce wood. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 66, 2008, Nr. 6, S. 433-438
- Burmester, A.: Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit und morphologischen, physikalischen und mechanischen Eigenschaften von Holz. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 23, 1965, S. 227-236
- Burmester, A.: Nachweis von Ästen in Kiefernholz durch Ultraschall. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 25, 1967, S. 157-163
- Deppe, H.-J.; Rühl, H.: Zur Beurteilung alter Bauhölzer. In: *Holz als Roh- und Werkstoff*, 1993, Nr. 51, S. 379-383
- Eckstein, D.; Saß, U.: Bohrwiderstandsmessungen an Laubbäumen und ihre holzanatomische Interpretation. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 52, 1994, S. 279-286
- Ehlbeck, J.; Görlacher, R.: Erste Ergebnisse von Festigkeitsuntersuchungen an altem Konstruktionsholz. Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke, Erhaltungskonzepte, SFB 315, Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, Berlin, 1988
- Ehlbeck, J.; Görlacher, R.: Bohrwiderstandsmessungen an eingebautem Konstruktionsholz. Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke, Erhaltungskonzepte, SFB 315, Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, Berlin, 1990
- Ehlbeck, J.; Görlacher, R.: Probleme bei der Beurteilung der Tragfähigkeit von altem Konstruktionsholz. Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke, Erhaltungskonzepte, SFB 315, Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und Technische Wissenschaften, Berlin, 1993
- Erlor, K.: Alte Holzbauwerke Beurteilen und Sanieren. 2. Aufl., Verlag für Bauwesen GmbH, Berlin, 1997
- Fengel, D.; Wegener, G.: Wood- Chemistry, Ultrastructure, Reactions. 2. Aufl., Walter de Gruyter Verlag Berlin, New York, 1989
- Frech, P.: Beurteilungskriterien für die Rißbildung im konstruktiven Holzbau. In: *Bauen mit Holz*, 1987, Nr. 9, S. 582-585
- Glos, P.: Festigkeit von Fichten-Bauholz mit Insekten- und Pilzbefall, Biegefestigkeit. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 47, 1989, S. 329-335

- Glos, P.; Schulz, H.: Qualität und Festigkeit von Bauschnittholz aus Waldschadensgebieten. In: Holz als Roh- und Werkstoff 44, 1986, S. 293-302
- Görlacher, R.(1): Zerstörungsarme Untersuchungen an altem Konstruktionsholz. In: Arbeitshefte des Sonderforschungsbereiches 315, Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke 10, 1991, S. 73
- Görlacher, R.(2): Bestimmung des Elastizitätsmodul. In: Bauen mit Holz 93, 1991, Nr. 8, S. 582-587
- Görlacher, R.; Hättich, R.: Untersuchung von altem Konstruktionsholz. Die Bohrwiderstandsmessung. In: Bauen mit Holz, 1990, Nr. 6, S. 456-459
- Häselbarth, G.: Untersuchungen zur Korrelation von Zement- und Betoneigenschaften. Dissertation (A), Weimar, 1985
- Hasenstab, A.: Integritätsprüfung von Holz mit dem zerstörungsfreien Ultraschallechoverfahren. Dissertation, Technische Universität Berlin, Berlin, 2006
- Hasenstab, A. (1): Ultraschallecho mit Longitudinal- und Transversalwellen zur zerstörungsfreien Prüfung von Holz. In: Holztechnologie 48, 2007, Nr. 2, S. 39-44
- Hasenstab, A. (2): Ultraschall-Echo zur Ortung von Rissen in Brettschichtholz (BSH). DGZfP-Jahrestagung, V 39, Fürth, 2007
- Hasenstab, A.: Die Ultraschall-Echo-Methode: Ein neues zerstörungsfreies Prüfverfahren zur Untersuchung von Holz. In: Forum Eipos 14, 2008, S. 70-95
- Hasenstab, A.; Krause, M.; Hillemeier, B.; Rieck, C.: Ultraschallecho-Messungen an Holz. In: Holz als Roh- und Werkstoff, 2006, Nr. 64, S. 475-481
- Hasenstab, A.; Krause, M.: Ultraschall-Echo-Technik zur Ortung von Minderdicken und Schäden in Holzbauteilen. DGZfP-Jahrestagung, P 18, Berlin, 2006
- Hasenstab, A.; Homburg, S.; Jost, G.; Roloff, J.: Zerstörungsfreie Prüfverfahren an Holz und Beton im Bauwesen. In: Messtechnik im Bauwesen, 2007, S. 50-54
- Hättich, R.: Bohrwiderstandsmessungen zur Ermittlung der Geometrie von Holzverbindungen. Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke, Erhaltungskonzepte, SFB 315, Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, Berlin, 1990, S. 216-217
- Hiese, W.: Baustoffkenntnis. 15. Aufl., Werner Verlag, 2003
- Hoadley, R.B.: Holz als Werkstoff., Otto Maier, Ravensburg, 1990
- Hoferichter, E.; Wehle: Chemische Analyse von Nadelhölzern unterschiedlichen Probenalters, Bestimmung der Hauptbestandteile der Zellwand und ausgewählter Holzextrakte. Institut für Holztechnologie Dresden gGmbH: Prüfbericht 18/93-50, ihd, Dresden, 1993
- Holz, D.: Alterungsverhalten des Werkstoffes Holz. In: Holztechnologie 22, 1981, Nr. 2
- Holz-Lexikon. Bd. 1, 3. Aufl., DRW-Verlag Weinbrenner KG, Leinefelden-Echterdingen, 1988
- Holz-Lexikon. Bd. 2, 3. Aufl., DRW-Verlag Weinbrenner KG, Leinefelden-Echterdingen, 1988
- Huckfeldt, T.: Ökologie und Cytologie des Echten Hausschwammes (*Serpula lacrimans*) und anderer Hausfäulepilze. Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft Hamburg Bd. Nr. 213, Kommissionsverlag, Hamburg, 2003
- Huckfeldt, T.; Schmidt, O.: Hausfäule- und Bauholzpilze. Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH&Co.KG, Köln, 2006
- Keylwerth, R.: Statistik bei der Holzprüfung. In: Holz als Roh- und Werkstoff 13, 1955, Nr. 5, S. 169-178
- Koch, G.: Sekundäre Veränderungen im Holz dynamisch beanspruchter Fichten (*Picea abies* [L.]Karst.) aus immisionsbelasteten und windexponierten Hochlagenbeständen. In: Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Forst-und Holzwirtschaft Hamburg, 1999, Nr. 192

- Kollmann, F.: Über die Abhängigkeit einiger mechanischer Eigenschaften der Hölzer von der Zeit, von Kerben und von der Temperatur. In: Holz als Roh- und Werkstoff 10, 1952, Nr. 6
- Kollmann, F.: Statistik für den Holzfachmann. In: Holz- Zentralblatt 104, 1978, Nr. 29, S. 471-472
- Konarski, B.; Wuzny, J.: Zusammenhang zwischen der Ultraschallgeschwindigkeit und den mechanischen Eigenschaften pilzbefallenen Holzes. In: Holz als Roh- und Werkstoff 35, 1977, S. 341-345
- Kothe, E.: Moderne zerstörungsarme Prüfmethoden zur Beurteilung verbauten Holzes. In: Bauzeitung 40, 1986
- Kraft, U.; Pribbernow, D.: Handbuch der Holzprüfung. Verlag Bau+Technik GmbH, Düsseldorf, 2006
- Krautkrämer, J. und H.: Werkstoffprüfung mit Ultraschall. 5. Aufl., Springer Verlag, Berlin, 1986
- Kucera, B.: Holzfehler und ihr Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Fichte und Kiefer. In: Holztechnologie 14, 1973, Nr. 1, S. 8-17
- Liese, W.; Ammer, U.: Über den Einfluß von Moderfäulepilzen auf die Schlagbiegefestigkeit von Buchenholz. In: Holz als Roh- und Werkstoff 22, 1964, S. 455-459
- Liese, W.; Pechmann, von, H.: Untersuchungen über den Einfluß von Moderfäulepilzen auf die Holzfestigkeit. In: Forstwissenschaftliches Centralblatt 78, 1959, S. 271-279
- Lißner, K.; Rug, W.: Ergänzung bzw. Präzisierung der für die Nachweisführung zur Stand- und Tragsicherheit sowie Gebrauchstauglichkeit von Holzkonstruktionen in der Altbausubstanz maßgebenden Abschnitte der DIN 1052: August 2004. Bauforschung, T 3068, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2005
- Mattheck, C.: Design in der Natur. Der Baum als Lehrmeister. 3. Aufl., Rombach GmbH Druck- und Verlagshaus, Freiburg im Breisgau, 1997
- Mönck, W.; Erler, K.: Schäden an Holzkonstruktionen. 4. Aufl., Huss- Medien GmbH, Berlin, 2004
- Müller, J.: Holzschutz im Hochbau., Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2005
- Niemz, P.: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe., DRW- Verlag, Leinefelden-Echterdingen, 1993
- Niemz, P.: Innere Defekte von Bäumen mit Schall bestimmt. In: Holz- Zentralblatt, 2001, Nr. 12, S. 169-171
- Niemz, P.: Untersuchungen zum Einfluß der Schnitttrichtung auf die Schallgeschwindigkeit und die Scherfestigkeit bei Buchen- und Fichtenholz, Kurzoriginalia. In: Holz als Roh- und Werkstoff 61, 2003, S. 187-188
- Niemz, P.; Kucera, L.J.; Bernatowicz, G.: Untersuchungen zum Einfluß des Faserwinkels auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schallwellen in Holz, Kurzoriginalia. In: Holz als Roh- und Werkstoff 57, 1999, S. 225
- Nier, J.: Experimentelle Festigkeitsuntersuchungen an alten Bauhölzern und daraus abgeleitete Erkenntnisse zur Tragfähigkeitsbeurteilung. Dissertation, Technische Hochschule Leipzig, Leipzig, 1994
- Riedel, K.; Zimmermann, M.: Holz und Holzschutz. Bauhaus-Universität Weimar, F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde: Schriftenreihe des F.A. Finger-Instituts für Baustoffkunde, Universitätsverlag, Weimar, 2001
- Rinn, F.: Chancen und Grenzen bei der Untersuchung von Konstruktionshölzern mit der Bohrwiderstandsmethode. In: Bauen mit Holz, 1992, Nr. 9, S. 745-748
- Rinn, F.: Gucken, klopfen, bohren. Messen auf der Baustelle. Zerstörungsfreie Bohrwiderstandsmessung. In: Bausubstanz 9, 1993, Nr. 5, S. 49-52

- Rinn, F.: Stellungnahme zur Bohrwiderstandsmessung. In: Bausubstanz, 1994, Nr. 1, S. 58-59
- Rug, W.; Held, H.: Die Bohrwiderstandsmessung (Teil1). In: Bauzeitung 49, 1995, Nr. 11, S. 50-52
- Rug, W.; Seemann, A.: Festigkeit von Altholz. In: Holztechnologie 29, 1988, Nr. 4, S. 186-190
- Rug, W.; Seemann, A.: Ermittlung von Festigkeitskennwerten an alten Holzkonstruktionen. In: Holztechnologie Leipzig, 1989, Nr. 30
- Sachs, L.; Hedderich, J.: Angewandte Statistik. 12. Aufl., Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006
- Scheffler, E.: Einführung in die Praxis der statistischen Versuchsplanung. 1. Aufl., VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1973
- Schlengermann, U.: Taschenbuch Ultraschall-Werkstoffprüfung. 3. Aufl., Vulkan Verlag, Essen, 1992
- Sonderforschungsbereich 315: Bauaufnahme. Befunderhebung und Schadensanalyse an historischen Bauwerken, 13. Kolloquium des SFB 315, 23.-24. Oktober 1987. Arbeitshefte des Sonderforschungsbereiches 315 "Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke" Bd. 8, Dokumentationsstelle des SFB 315, 1988
- Stark, J.; Wicht, B.: Geschichte der Baustoffe. Fakultät Bauingenieurwesen, Lehrstuhl Baustoffe 1. Aufl., Hochschulverlag der HAB Weimar, Weimar, 1995
- Steck, G.; Görlacher, R.: Methoden der zerstörungsfreien und zerstörungssarmen Prüfung von Bauholz- eine Literaturlauswertung. Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke, Erhaltungskonzepte, SFB 315, Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, Berlin, 1987, S. 191-209
- Steeb, S.: Zerstörungsfreie Werkstück- und Werkstoffprüfung. Kontakt und Studium Bd. 243 3. Aufl., expert Verlag, Renningen, 2005
- Tobisch, S.; Mittag, C.: Zerstörungsfreie Untersuchungen von Schadphänomenen an Bauholz (1). In: Holz-Zentralblatt 15, 1998, S. 236-238
- Trendelenburg, R.: Über die Abkürzung der Zeitdauer von Pilzversuchen an Holz mit Hilfe der Schlagbiegeprüfung. In: Holz als Roh- und Werkstoff 3, 1940, S. 397-407
- Uhde, C.: Der Holzbau, Reprint. Reprint- Verlag- Leipzig 3. Reprint. Aufl., Ernst Wasmuth, Berlin, 1903
- Vitruv (Vitruvius Pollio): Baukunst. Bücher I-V. Bd. 1, 2. Aufl., Birkhäuser Verlag, Basel, 1987
- von Laar, C.: Wie sicher lassen sich Holzschäden über Bohrwiderstandsmessungen ermitteln?. In: Messen und Sanieren Heft 17, 2006
- von Pechmann, H.; Schaile, O.: Über die Änderung der dynamischen Festigkeit und der chemischen Zusammensetzung des Holzes durch den Angriff holzzerstörender Pilze. In: Forstwissenschaftliches Centralblatt 69, 1950, Nr. 8, S. 441-466
- Wagenführ, A.: Die strukturelle Anisotropie von Holz als Chance für technische Innovationen. Sitzungsberichte der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig Bd. 2, Verlag der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig, 2007
- Wagenführ, A.; Scholz, F.: Taschenbuch der Holztechnik. 1. Aufl., Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München, 2008
- Wagenführ, R.: Anatomie des Holzes. 2. Aufl., VEB Fachbuchverlag Leipzig, 1980
- Wälchli, O.: Der echte Hausschwamm - Erfahrungen über Ursachen und Wirkungen seines Auftretens. In: Holz als Roh- und Werkstoff 38, 1980, S. 169-174
- Waltheim, U.: Experimentell ermittelte Festigkeits- und Brucheigenschaften von Holz in alten Bauwerken. In: Der Bauingenieur, 1988, S. 273 ff.

- Wegelin, H. M.: Die Festigkeit verstockten Rotbuchenholzes. In: Holz als Roh- und Werkstoff 11, 1953, S. 175-179
- Weimar, H.: Aspekte der stofflichen Charakterisierung von Altholz. Diplomarbeit an der Universität Hamburg, Fachbereich Biologie, Hamburg, 2000
- Wilcox, W. W.: Review of literature on the effects of early stages of decay on wood strength. In: Wood and fiber science 9, 1978, S. 252-257
- Winandy, J. E.; Morell, J. J.: Relationship between incipient decay, strength, and chemical composition of douglas-fir heartwood. In: Wood and fiber science 25, 1993, S. 278-288
- Winter, K.; Held, H.: In-situ-Prüfverfahren für verbautes Holz. In: bau-zeitung 50, 1996, Nr. 11
- Ziegenhals, G.; Kluck, D: Entwicklung von Algorithmen zur quantitativen Beschreibung der Holzqualität aus Ergebnissen von Bohrnadeluntersuchungen. Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben Nr. 99 NR 021, 2000
- Zienthén, R.: Reliability of proof-loaded Norway spruce . In: Holz als Roh- und Werkstoff 66, 2008, Nr. 6, S. 401-408
- Zwerenz, K.: Statistik. Datenanalyse mit Excel und SPSS., Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, München, 2006
- Zycha, H.: Einwirkung einiger Moderfäulepilze auf Buchenholz. In: Holz als Roh- und Werkstoff 22, 1964, S. 37-42

Normenverzeichnis

DIN 1052	Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken. Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 08/2004
DIN 1055-100	Einwirkungen auf Tragwerke. Grundlagen der Tragwerksplanung, Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 03/2001
DIN 4074-1	Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit. Teil 1: Nadel schnittholz. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 12/2008
DIN 4074-2	Bauholz für Holzbauteile. Blatt 2: Gütebedingungen für Baurundholz (Nadelholz). Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Vertrieb GmbH, Berlin, 12/1958
DIN 4074-3	Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit. Teil 3: Sortiermaschinen für Schnittholz, Anforderungen und Prüfung. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 12/2008
DIN 4074-4	Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit. Teil 4: Nachweis der Eignung zur maschinellen Schnittholzsortierung. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 12/2008
DIN 4074-5	Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit. Teil 5: Laubschnittholz. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 12/2008
DIN 52183	Prüfung von Holz. Bestimmung des Feuchtegehaltes. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 11/1977
DIN 52185	Prüfung von Holz. Bestimmung der Druckfestigkeit parallel zur Faser. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 06/1978
DIN 52186	Prüfung von Holz. Biegeversuch. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 06/1978
DIN 52189	Prüfung von Holz. Schlagbiegeversuch. Bestimmung der Bruchschlagarbeit. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 12/1981
DIN 68800-1	Holzschutz im Hochbau. Blatt 1: Allgemeines. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 05/1974
DIN 68800-2	Holzschutz im Hochbau. Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 05/1996
DIN 68800-3	Holzschutz im Hochbau. Teil 3: Vorbeugender chemischer Holzschutz. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 04/1990
DIN 68800-4	Holzschutz. Teil 4: Bekämpfungsmaßnahmen gegen holzerstörende Pilze und Insekten. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 11/1992
DIN 68800-5	Holzschutz im Hochbau. Teil 3: Vorbeugender chemischer Schutz von Holzwerkstoffen. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 05/1978
DIN 52182	Prüfung von Holz. Bestimmung der Rohdichte. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 09/1976

DIN EN 338	Bauholz für tragende Zwecke. Festigkeitsklassen. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 09/2003
DIN EN 350-1	Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten. Natürliche Dauerhaftigkeit von Vollholz. Teil 1: Grundsätze für die Prüfung und Klassifikation der natürlichen Dauerhaftigkeit von Holz, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 10/1994
DIN EN 350-2	Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten. Natürliche Dauerhaftigkeit von Vollholz. Teil 2: Leitfaden für die natürliche Dauerhaftigkeit und Tränkbarkeit von ausgewählten Holzarten von besonderer Bedeutung in Europa. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 10/1994
DIN EN 384	Bauholz für tragende Zwecke. Bestimmung charakteristischer Werte für mechanische Eigenschaften und Rohdichte. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 05/2004
DIN EN 460	Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten. Natürliche Dauerhaftigkeit von Vollholz. Leitfaden für die Anforderungen an die Dauerhaftigkeit von Holz für die Anwendung in Gefährdungsklassen. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 10/1994
DIN EN 1912	Bauholz für tragende Zwecke. Festigkeitsklassen. Zuordnung von visuellen Sortierklassen und Holzarten. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 03/2005
DIN EN 13183-1	Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz. Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 12/2002 (Berichtigung 12/2003)
DIN EN 13183-2	Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz. Teil 2: Schätzung durch elektrisches Widerstands-Messverfahren. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 12/2002 (Berichtigung 12/2003)
TGL 25106/01	Prüfung von Holz. Probennahme und allgemeine Festlegungen für physikalisch-mechanische Prüfungen. Zentralstelle für Standardisierung, Dresden, 07/1979
TGL 25106/06	Prüfung von Holz. Bestimmung der Druckfestigkeit in Faserrichtung. Zentralstelle für Standardisierung, Dresden, 07/1979
TGL 25106/08	Prüfung von Holz. Bestimmung der Biegefestigkeit bei statischer Belastung. Zentralstelle für Standardisierung, Dresden, 07/1979
TGL 25106/09	Prüfung von Holz. Bestimmung der Biegefestigkeit und Schlagbiegefestigkeit an kleinen Proben. Zentralstelle für Standardisierung, Dresden, 06/1970
TGL 25106/12	Prüfung von Holz. Bestimmung des Elastizitätsmoduls bei statischer Biegung in der Zone der reinen Biegung. Zentralstelle für Standardisierung, Dresden, 09/1980
TGL 33135/01	Holzbau. Tragwerke. Berechnung, Bauliche Durchbildung. Zentralstelle für Standardisierung, Dresden, 01/1984

Abbildungsverzeichnis

Die Abbildungsunterschriften sind zum Teil gekürzt wiedergegeben.

Abb. 1: Zapfen- und Dornausbildung bei Megalithbauten	9
Abb. 2: Ermittlung der mittleren Jahrringbreite bei Kanthölzern und Bohlen nach DIN 4074-1	15
Abb. 3: Astmaße und Ermittlung der Ästigkeit nach DIN 4074-1	16
Abb. 4: Holzzelle, schematische Darstellung mit Verteilung der Hauptbestandteile in den	19
Abb. 5: Quellverhalten von Holz	22
Abb. 6: Abhängigkeit einiger Festigkeits- und Elastizitätskennwerte von der Faserrichtung	22
Abb. 7: Schallgeschwindigkeit (Longitudinalwellen) in Abhängigkeit von der Faserrichtung	22
Abb. 8: Abhängigkeit ausgewählter Festigkeits- und Elastizitätskennwerte vom	24
Abb. 9: Unbedenkliche maximale Risstiefen bei Biegebeanspruchung, für beidseitige (links)	25
Abb. 10: Klassifizierung von Pilzen im Bauwesen	26
Abb. 11: Moderfäule bei Nadelholz mit typischer Verfärbung und Würfelbruch durch	27
Abb. 12: Braunfäule (<i>Coniophora puteana</i>) an der Unterseite einer Dielung	28
Abb. 13: Marmorfäule (<i>Trametes versicolor</i>) an Rotbuche (<i>Fagus sylvatica</i> L.)	28
Abb. 14: Biegefestigkeits- und Masseverlust durch Moderfäule nach Auswertung und	33
Abb. 15: Veränderung des E-Moduls und der Masse durch Moderfäule nach Auswertung aus	35
Abb. 16: Verlust von Bruchschlagarbeit und Masse durch Echten Hausschwamm nach	36
Abb. 17: Prinzipskizzen zur Longitudinal- und Transversalwelle, Markierung der Wellenlänge λ	37
Abb. 18: Prinzipdarstellung der Durchschallungs- und der Echotechnik	41
Abb. 19: Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von Longitudinalwellen vom Faserwinkel	42
Abb. 20: Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von Longitudinalwellen vom Feuchtegehalt	42
Abb. 21: A-Bild eines Holzprüfkörpers (Wechselsignal, 55 kHz)	45
Abb. 22: A-Bild einer Ultraschallechoprüfung eines Holzbalkens (gleichgerichtetes Signal)	45
Abb. 23: Darstellung der Bezugsebenen in Abhängigkeit von der Prüfrichtung	46
Abb. 24: Bohrnadel, Fa. IML	47
Abb. 25: Bohrkurve mit guter Jahrringerkennung	48
Abb. 26: Bohrdiagramm eines Kiefern balkens mit Innenfäule	54
Abb. 27: Balkenabschnitt vor (links) und nach (rechts) dem Einschnitt	55
Abb. 28: Entzerrungsgitter über dem perspektivischen Digitalfoto	56
Abb. 29: Entzerrter, skaliertes und visualisierter Prüfkörper im CAD	56
Abb. 30: Elektrisches Feuchtigkeitsmessgerät „Pocket 3“ mit Rammelektrode	57
Abb. 31: Verdichtetes Prüfraster im Übergangsbereich eines geschädigten Balkens	59
Abb. 32: Geschädigter Querschnitt	60
Abb. 33: Geschädigter Querschnitt mit Zonen für die Probennahme	60
Abb. 34: Prismenherstellung mit Zonen	60
Abb. 35: Niederfrequentes Ultraschallmessgerät Monolith A 1220, Fa. ACSYS	62
Abb. 36: Prüfkopfarray mit Markierung des Sendeblockes (je nach Polung) und der	62
Abb. 37: Prüfkörper während der Messungen am F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde	63
Abb. 38: B-Bild eines Prüfkörpers mit Markierung der Schnittebene bei 290 μ s	64
Abb. 39: C-Bild des Prüfkörpers bei 290 μ s mit nur teilweiser Detektion der Rückwand	64
Abb. 40: Markierung von Laufzeitgruppen im B-Bild, 55 KHz vgl. dazu mit Abb. 38	65
Abb. 41: Laufzeitgruppe 211 - 240 μ s mit vergleichsweise geringem Amplitudenniveau, 55 kHz	65
Abb. 42: Laufzeitgruppe 271 - 300 μ s mit hohem Amplitudenniveau und deutlichen Peaks	65
Abb. 43: Laufzeitgruppe 331 - 360 μ s mit geringem Amplitudenniveau, 55 kHz	65
Abb. 44: Amplitudenauswertung eines summierten A-Bildes mit einer gemittelten Kurve von	66
Abb. 45: Anzahl der Datensätze der Stichprobe der Feuchtigkeitsklassen	67
Abb. 46: Rohdichteverteilung bei ω = 12 % der Prüfkategorien der Balken	68

Abb. 47: Schallgeschwindigkeiten der Prüfkategorien	68
Abb. 48: Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit und Rohdichte der geprüften	69
Abb. 49: Querschnittszonen der Richtungsanteile der Jahrringe am Beispiel eines Kiefern balkens ..	70
Abb. 50: Verteilung der mittleren Schallgeschwindigkeit über den Querschnitt.....	70
Abb. 51: Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit und Feuchtegehalt für Fichten-	71
Abb. 52: Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit und Feuchtegehalt für Lärchen-	71
Abb. 53: Altholz Kiefernprüfkörper mit Weißast (\varnothing 50 mm) bzw. Astquirl	72
Abb. 54: B-Bild des Prüfkörpers mit Astquirl bei etwa 30 - 40 cm Balkenlänge, schwache Signale	72
Abb. 55: Neuholz-Lärchenprüfkörper mit Schwarzast (\varnothing 12 mm)	73
Abb. 56: B-Bild des Lärchenprüfkörpers mit Astbereich bei 30 cm Balkenlänge, schwache Signale) .	73
Abb. 57: Kiefernprüfkörper mit senkrecht zur Prüfrichtung liegendem Ast	74
Abb. 58: B-Bilder der Messungen eines Astes senkrecht zur Schallausbreitungsrichtung	74
Abb. 59: Probekörper (Fichte, Foto entzerrt) mit parallel zur Schallausbreitungsrichtung	76
Abb. 60: C-Bild des Probekörpers der Laufzeitgruppe 11 - 20 μ s, ohne bzw. mit schwachem.....	76
Abb. 61: Visualisierter Kiefernprüfkörper mit senkrecht zur Prüfrichtung liegendem Riss	77
Abb. 62: B-Bild der in Abb. 61 markierten Reihe mit Rissverlauf (55 kHz, Raster 2,5 cm)	77
Abb. 63: Visualisierter Kiefernprüfkörper mit senkrecht zur Prüfrichtung liegendem Riss	78
Abb. 64: B-Bild der in Abb. 63 markierten Reihe mit Rissverlauf (55 kHz, Raster 2,5 cm)	78
Abb. 65: Vorzeichendefinition des Abstandes der Risswurzel von der Arrayachse	78
Abb. 66: Prüfseite der Übergangszone, ungeschädigte Oberseite eines Fichtenbalkens, Grafik	81
Abb. 67: Geschädigte Unterseite des Fichtenbalkens, Grafik aus Darstellungsgründen längs.....	81
Abb. 68: Rückwandsignal bei 385 μ s ist in der Übergangszone eines geschädigten Fichtenbalkens	81
Abb. 69: Kiefern balken mit Innenfäule und umliegender, intakter Holzsubstanz.....	82
Abb. 70: B-Bilder mit Echo der Grenzfläche im geschädigten Kernbereich der Kiefer	82
Abb. 71: B-Bild (gereimte Einzelbilder) eines Fichtenbalkens, ω = 7,4 % (oben), ω = 24,3 %	83
Abb. 72: B-Bild mit beidseitig diagonal verlaufendes Echosignal eines Kiefernprüfkörpers	84
Abb. 73: Amplitudenvergleich der B-Bilder eines Rissechos bei unterschiedlichen	85
Abb. 74: Rückwandsignal mit seitlicher Signalauslöschung	85
Abb. 75: Bohrwegmarkierung, Strecke x_0 (Schwindriss) ohne Ansatz.....	90
Abb. 76: Bohrwegmarkierung, Strecke x_0 (Ast) ohne Ansatz.....	90
Abb. 77: Rohdichtemittelwerte der Prüfkategorien für Fichte und Kiefer bei ω = 12 %	91
Abb. 78: Bohrwiderstand der Prüfkategorien der Prismen.....	92
Abb. 79: Radialbohrung mit Kennzeichnung der Lage am Prüfprisma	93
Abb. 80: Tangential-/Radialbohrung mit Kennzeichnung der Lage am Prüfprisma	93
Abb. 81: Tangentialbohrung mit Kennzeichnung der Lage am Prüfprisma	93
Abb. 82: Zusammenstellung des Bohrwiderstandes für die unterschiedenen Bohrrichtungen	93
Abb. 83: Zusammenstellung der Variationskoeffizienten des Bohrwiderstandes für die	94
Abb. 84: Zusammenhang zwischen Bohrwiderstand und Rohdichte (ω = 12 %) der tangential	95
Abb. 85: Zusammenhang zwischen Bohrwiderstand und Rohdichte (ω = 12 %) aller Neu hölzer	95
Abb. 86: Rohdichte (ω = 12 %) innerhalb der definierten Schadenszonen der	96
Abb. 87: Bohrwiderstand der Prismen unter Berücksichtigung der Schadenszonen	96
Abb. 88: Zusammenhang zwischen Bohrwiderstand und Rohdichte (ω = 12 %) der Schadenszone 197	97
Abb. 89: Zusammenhang zwischen Bohrwiderstand und Rohdichte (ω = 12 %) der Schadenszone 297	97
Abb. 90: Zusammenhang zwischen Bohrwiderstand und Rohdichte (ω = 12 %) der Schadenszone 397	97
Abb. 91: Anzahl der Bohrwiderstandsmessungen der jeweiligen Feuchtigkeitsklasse	98
Abb. 92: Rohdichteverteilung (ω = 12 %) der Prüfkategorien der Balken	99
Abb. 93: Bohrwiderstand der Prüfkategorien der Balken	100
Abb. 94: Übersicht der Variationskoeffizienten des Bohrwiderstandes der Balken nach	101
Abb. 95: Zusammenhang von Bohrwiderstand und Rohdichte der Fichten-Neu hölzer, r_{xy} = 0,74	101

Abb. 96: Zusammenhang von Bohrwiderstand und Rohdichte aller Prüfhölzer mit $\Delta\rho \geq 0,025 \text{ g/cm}^3$	102
Abb. 97: Vergleich der Abweichung der Rohdichte der Neuhölzer von Fichte, Kiefer und Lärche.....	103
Abb. 98: Bohrwiderstand der Prüfkategorien nach Einteilung des Querschnitts in Zonen	103
Abb. 99: Übersicht der Variationskoeffizienten der Bohrwiderstandswerte der Balken nach	104
Abb. 100: Querschnitt eines Fichtenbalkens.....	104
Abb. 101: Rohdichteverteilung ($\omega = 12 \%$) über den Querschnitt	104
Abb. 102: Bohrwiderstandsverteilung über den Querschnitt.....	104
Abb. 103: Bohrwiderstand und Feuchtegehalt innerhalb der Rohdichteklasse von 0,46 bis	105
Abb. 104: Bohrkurve mit Amplitudenerhöhung nach Durchbohren eines Astbereiches	106
Abb. 105: Gegenüberstellung der Anstiege der Hin- und Rückbohrungen der Fichten- und	106
Abb. 106: Gegenüberstellung der Anstiege der Hin- und Rückbohrungen der Lärchenhölzer der	107
Abb. 107: Verlaufen der Bohrnadel durch tangentialen Bohrverlauf.....	108
Abb. 108: Darstellung des Winkels α_{BW} zwischen Bohrrichtung und Jahrringtangente	108
Abb. 109: Bohrkurve mit Markierung des Verlaufsgebietes	109
Abb. 110: Probekörper 1 mit Markierung des Rasters der Übergangszone, ungeschädigte	110
Abb. 111: Messwertdarstellung des Prüfkörpers 1 (Bohrwiderstandsintegral) mit Markierung der ...	111
Abb. 112: Messwertdarstellung des Prüfkörpers 1 (Bohrwiderstandsintegral) mit Markierung der	111
Abb. 113: Probekörper 1 der Untersuchung der Übergangszone (geschädigte Unterseite)	111
Abb. 114: Holzschädigung um die Risse gegenüber der beprobten Seite (Markierung rechts)	112
Abb. 115: Prüfmaschine TONICOMP am F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde	115
Abb. 116: Rohdichteverteilung der Druckprismen innerhalb der Prüfkategorien	116
Abb. 117: Druckfestigkeit ($\omega = 12 \%$) der Prismen der Prüfkategorien	116
Abb. 118: Zusammenhang von Druckfestigkeit und Rohdichte der Druckprismen der Fichten-	117
Abb. 119: Zusammenhang von Druckfestigkeit und Rohdichte der Druckprismen der Kiefern-.....	117
Abb. 120: Zusammenhang von Druckfestigkeit und Rohdichte aller Fichten- ($r_{xy} = 0,59$) und	117
Abb. 121: Rohdichte innerhalb der definierten Schadenszonen der Druckprismen	118
Abb. 122: Druckfestigkeit innerhalb der definierten Schadenszonen der Druckprismen.....	118
Abb. 123: Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und Rohdichte der Zone 1, $r_{xy} = 0,60$;	119
Abb. 124: Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und Rohdichte der Zone 2, $r_{xy} = 0,67$;	119
Abb. 125: Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und Rohdichte der Zone 3, $r_{xy} = 0,96$;	119
Abb. 126: Altholzbalken im Aufspannfeld während der Prüfung an der Versuchstechnischen	121
Abb. 127: Prisma während der Prüfung mit der TIRatest 24100 am F.A. Finger-Institut für	121
Abb. 128: Profilaufnahme Balkenquerschnitt (links) und daraus generierte Querschnittswerte.....	122
Abb. 129: Feuchtegehalte der Prüfbalken.....	124
Abb. 130: Rohdichte der Prüfbalken	124
Abb. 131: Mittlere Jahrringbreiten der Sortierklassen	125
Abb. 132: Ästigkeit der Sortierklassen	125
Abb. 133: Anzahl der Holzarten in den Sortierklassen.....	125
Abb. 134: Bruch eines Prüfbalkens ausgehend von einem Astquirl	126
Abb. 135: Bruch eines Prüfbalkens ausgehend von einer Ausklinkung in der Zugzone	126
Abb. 136: Kraft-Weg-Diagramm eines geschädigten Balkens (Tanne)	126
Abb. 137: Zusammenhang von Biegefestigkeit und E-Modul unter Berücksichtigung des realen	128
Abb. 138: Rohdichteverteilung der Biegeprismen.....	129
Abb. 139: Biegefestigkeit ($\omega = 12 \%$) der Prismen der Neu- und geschädigten Althölzer	129
Abb. 140: E-Modul ($\omega = 12 \%$) der Prismen der Neu- und geschädigten Althölzer	130
Abb. 141: Biegefestigkeit und Rohdichte aller Fichten-Neu- und Altholzprismen, $r_{xy} = 0,37$	130
Abb. 142: Zusammenhang von Biegefestigkeit und E-Modul der geprüften Fichtenprismen.....	131
Abb. 143: Zusammenhang von Biegefestigkeit und E-Modul der geprüften Kiefernprismen	131

Abb. 144: Biegefestigkeit ($\omega = 12\%$) aller geprüften Hölzer der Schadenszonen 1 bis 3.....	132
Abb. 145: E-Moduli ($\omega = 12\%$) aller geprüften Hölzer der Schadenszonen 1 bis 3	132
Abb. 146: Biegefestigkeiten der Prismen nach Zuordnung zu den Schadenszonen.....	133
Abb. 147: E-Moduli der Prismen nach Zuordnung zu den Schadenszonen	133
Abb. 148: Zusammenhang von Biegefestigkeit und E-Modul der Kiefernhälzer.....	133
Abb. 149: Zusammenhang von Biegefestigkeit und E-Modul der Kiefernhälzer.....	134
Abb. 150: Zusammenhang von Biegefestigkeit und E-Modul der Kiefernhälzer.....	134
Abb. 151: Pendelschlagwerk zur Durchführung der Untersuchungen	137
Abb. 152: Rohdichteverteilung der Schlagbiegeprismen innerhalb der Prüfkategorien	138
Abb. 153: Bruchschlagarbeit der Prismen innerhalb der Prüfkategorie	138
Abb. 154: Zusammenhang von Bruchschlagarbeit und Rohdichte des Fichten-Neuholzes	139
Abb. 155: Zusammenhang von Bruchschlagarbeit und Rohdichte des Kiefern-Neuholzes	139
Abb. 156: Rohdichte innerhalb der definierten Schadenszonen der Schlagbiegeprismen.....	139
Abb. 157: Bruchschlagarbeit aller geprüften Prismen unter Berücksichtigung der Schadenszonen..	140
Abb. 158: Bruchschlagarbeit der Prismen der geschädigten Hölzer unter Berücksichtigung der	140
Abb. 159: Zusammenhang von Bruchschlagarbeit und Rohdichte des geschädigten Kiefernholzes.	141
Abb. 160: Zusammenhang von Druckfestigkeit und Bohrwiderstand der Nadelholzprismen	146
Abb. 161: Zusammenhang von Biegefestigkeit und Bohrwiderstand der Nadelholzprismen	146
Abb. 162: Zusammenhang von E-Modul und Bohrwiderstand der Nadelholzprismen, $r_{xy} = 0,57$	146
Abb. 163: Zusammenhang von Bruchschlagarbeit und Bohrwiderstand der Fichten-.....	147
Abb. 164: Zusammenhang von Bruchschlagarbeit und Bohrwiderstand der geschädigten Kiefern-..	147
Abb. 165: Zusammenhang von Biegefestigkeit und Bohrwiderstand der Balken, $r_{xy} = 0,51$	151

Tabellenverzeichnis

Die Tabellenüberschriften sind zum Teil gekürzt wiedergegeben.

Tab. 1: Beispiele zur Anisotropie von Holz	22
Tab. 2: Vergleich der Druckfestigkeiten von Neu- und Altholz.....	31
Tab. 3: Vergleich der Biegefestigkeiten von Altholz.....	33
Tab. 4: Vergleich der E-Moduli von Altholz	34
Tab. 5: Frequenzen und Wellenlängen für Holz beispielhaft bei einer Schallgeschwindigkeit von	38
Tab. 6: Änderung des Bohrwiderstandes ausgewählter Kriterien für Fichte.....	51
Tab. 7: Verteilungskennwerte der Schallgeschwindigkeit der Prüfbalken in Abhängigkeit von der	69
Tab. 8: Verteilungskennwerte der Schallgeschwindigkeit der Prüfbalken in Abhängigkeit vom.....	71
Tab. 9: Äste in Schallausbreitungsrichtung, Detektion bei 55 kHz und 2,5 cm Raster.....	73
Tab. 10: Äste quer zur Schallausbreitungsrichtung, Detektion bei 55 kHz und 2,5 cm Raster	75
Tab. 11: Risse quer zur Schallausbreitungsrichtung, Detektion bei 55 kHz und 2,5 cm Raster.....	78
Tab. 12: Verteilungskennwerte des Bohrwiderstandes der Prüfprismen in Abhängigkeit von der	98
Tab. 13: Verteilungskennwerte des Bohrwiderstandes der Prüfbalken in Abhängigkeit von der	102
Tab. 14: Kriterien des Verlaufs der Bohrnadel	109
Tab. 15: Verteilungskennwerte der Druckfestigkeit der Prüfprismen in Abhängigkeit vom E-Modul ..	120
Tab. 16: Einordnung der ermittelten Verteilungskennwerte der Druckfestigkeit für die.....	120
Tab. 17: Sortierklassen der Prüfbalken	125
Tab. 18: Bruchursachen der Balken.....	127
Tab. 19: Verteilungskennwerte der Biegeprüfungen der Altholzbalken	127
Tab. 20: Verteilungskennwerte der Biegefestigkeit der Altholzbalken in Abhängigkeit vom E-Modul	128
Tab. 21: Verteilungskennwerte der Biegefestigkeit der Prüfprismen in Abhängigkeit vom E-Modul ..	131
Tab. 22: Verteilungskennwerte der Biegefestigkeit der Prüfprismen in Abhängigkeit vom E-Modul ..	134
Tab. 23: Einordnung der ermittelten Verteilungskennwerte der Biegefestigkeit der Balken	135
Tab. 24: Einordnung der ermittelten Korrelationskennwerte von Biegefestigkeit und E-Modul der ...	135
Tab. 25: Einordnung der ermittelten Korrelationskennwerte von Biegefestigkeit und E-Modul der ...	136
Tab. 26: Zusammenfassung der Ergebnisse der Ultraschallecho-Untersuchungen	142
Tab. 27: Zusammenfassung der Ergebnisse der Bohrwiderstands-Untersuchungen	143
Tab. 28: Zusammenfassung der Ergebnisse der Druckfestigkeits-Untersuchungen.....	144
Tab. 29: Zusammenfassung der Ergebnisse der Biegefestigkeits- und Elastizitäts-Untersuchungen	144
Tab. 30: Zusammenfassung der Ergebnisse der Schlagbiegefestigkeits-Untersuchungen	145
Tab. 31: Ergebnisse der multiplen Regression der Bohrwiderstandsprismen für die Druckfestigkeit	148
Tab. 32: Ergebnisse der multiplen Regression der Bohrwiderstandsprismen für die Biegefestigkeit	148
Tab. 33: Ergebnisse der multiplen Regression der Bohrwiderstandsprismen für die Schlagbiege- ...	148
Tab. 34: Ergebnisse der multiplen Regression der Balken für die Schallgeschwindigkeit	150
Tab. 35: Ergebnisse der multiplen Regression der Balken für die Biegefestigkeit	152
Tab. 36: Ergebnisse der multiplen Regression der Balken für den E-Modul	152
Tab. 37: Ergebnisse der multiplen Regression der Balken für die Biegefestigkeit bei bekanntem.....	153
Tab. 38: Rechenwerte charakteristischer Festigkeitskennwerte nach DIN 1052, Tab. F.5	154
Tab. 39: Bemessungswerte für den Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit	155
Tab. 40: Vergleich der Bemessungswerte mit den Biegefestigkeitswerten aus Tab. 37	157

Anhangverzeichnis

A	ANHANG	A-1
A 1	Formeln zur Methodik	A-1
A 1.1	Statistik	A-1
A 1.2	Technische Kennwerte	A-5
A 1.3	Festigkeits- und Elastizitätskennwerte	A-7
A 1.4	Ultraschall	A-10
A 1.5	Bohrwiderstand	A-11
A 2	Verteilungskennwerte der Untersuchungsergebnisse	A-12
A 2.1	Ultraschallecho	A-12
A 2.2	Bohrwiderstand	A-13
A 2.3	Druckprüfung	A-19
A 2.4	Biegeprüfung	A-22
A 2.5	Schlagbiegeprüfung	A-26
A 2.6	Kombination der Einzeluntersuchungen	A-29
A 3	Übersicht zu den Untersuchungen an den Balken und Prismen	A-33
A 4	Weitere Untersuchungen	A-34
A 4.1	Bohrwiderstand an Sperrholzprismen	A-34
A 4.2	Applikation des Bohrwiderstandes der Prismendaten auf die Balken	A-37
A 4.3	Bohrwiderstand im Schadensübergangsbereich	A-39
A 4.4	Chemische Analysen des Schadensübergangsbereiches	A-41

A Anhang

A 1 Formeln zur Methodik

A 1.1 Statistik

A 1.1.1 Standardabweichung

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]}$$

Gl. A-1

$$v = \frac{s}{\bar{x}}$$

Gl. A-2

mit: s Standardabweichung
v Variationskoeffizient
n Umfang der Stichprobe
 x_i Einzelwert der Stichprobe
 \bar{x} arithmetischer Mittelwert

A 1.1.2 Korrelationskoeffizient

$$r_{xy} = \frac{s_{xy}}{\sqrt{s_x^2 \cdot s_y^2}}$$

Gl. A-3

mit: r_{xy} Korrelationskoeffizient
 s_{xy} Kovarianz
 s_x^2 Varianz von x
 s_y^2 Varianz von y

A 1.1.3 Kovarianz

$$s_{xy} = \frac{1}{n-1} \cdot \left[\sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i \right) \right]$$

Gl. A-4

mit: s_{xy} Kovarianz
n Umfang der Stichprobe
 x_i bzw. y_i Einzelwert der jeweiligen Stichprobe

A 1.1.4 Varianz

$$s_x^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \left[\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right] \quad \text{Gl. A-5}$$

$$s_y^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \left[\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \right] \quad \text{Gl. A-6}$$

mit: s_x^2 Varianz von x
 s_y^2 Varianz von y
n Umfang der Stichprobe
 x_i bzw. y_i Einzelwert der jeweiligen Stichprobe

A 1.1.5 Multiple Regression

- Modellansatz nach [91]

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1p} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{np} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad \text{Gl. A-7}$$

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_p x_{ip} + \varepsilon_i$$

mit: n Umfang der Stichprobe
 x_i Einzelwert der Stichprobe
 β_i Regressionskoeffizient der Teilstichprobe
 ε_i Residuen (Summe der Quadrate Abweichungen)

- Regressionskennwerte

$$r_m = \sqrt{B_m} \quad \text{Gl. A-8}$$

$$B_m = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad \text{Gl. A-9}$$

$$s_R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - k}} \quad \text{Gl. A-10}$$

mit:	r_m	multipler Regressionskoeffizient
	B_m	multipl. Bestimmtheitsmaß
	y_i	Werte der Zielgröße
	\hat{y}_i	Werte der Regression (aus Polynom)
	\bar{y}	arithmetischer Mittelwert der Zielgröße
	s_R	Reststandardabweichung
	n	Umfang der Stichprobe
	k	Anzahl der unabhängigen Variablen

- Adäquatheitstest

$$F_{\text{exp.}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{\text{ges}}} (y_i - \hat{y}_i)^2 - \sum_{i=1}^{n_0} (y_{0i} - \bar{y}_0)^2}{\frac{n_{\text{ges.}} - k - n_0 + 1}{s_R^2}} \quad \text{Gl. A-11}$$

mit:	y_i	Werte der Zielgröße
	\hat{y}_i	Werte der Regression (aus Polynom)
	y_{0i}	Werte der Zielgröße aus Wiederholungen (Experimentalfehler)
	\bar{y}_0	arithmetischer Mittelwert der Zielgröße aus Wiederholungen
	$n_{\text{ges.}}$	Umfang der Stichprobe
	k	Anzahl der unabhängigen Variablen
	n_0	Umfang der Stichprobe der Wiederholungen
	s_R^2	Restvarianz

Vergleich $F_{\text{exp.}}$ mit $F_{\text{Tab.}}$ (Tabellenwert)

- $F_{\text{exp.}} > F_{\text{Tab.}}$: Modell nicht adäquat, Anpassungsdefekt ist signifikant größer als Versuchsstreuung
- $F_{\text{exp.}} < F_{\text{Tab.}}$: Modell adäquat, Anpassungsdefekt ist signifikant kleiner als Versuchsstreuung

A 1.1.6 Ermittlung 3s-Grenzen

$$\frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) - 3 \cdot s \leq x_i \leq \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) + 3 \cdot s \quad \text{Gl. A-12}$$

mit: n Umfang der Stichprobe
 x_i Einzelwert der Stichprobe
 s Standardabweichung

A 1.2 Technische Kennwerte

A 1.2.1 Feuchtigkeitsgehalt

$$\omega = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \cdot 100 \% \quad \text{Gl. A-13}$$

mit: ω Feuchtigkeitsgehalt, [%]
 m_1 Masse der feuchten Probe vor der Trocknung, [g]
 m_0 Masse nach Darrtrocknung, [g]

A 1.2.2 Rohdichte

$$\rho_\omega = \frac{m_\omega}{V_\omega} \quad \text{Gl. A-14}$$

mit: ρ_ω Rohdichte bei Feuchtigkeitsgehalt ω [g/cm³]
 m_ω Masse der Probe, [g]
 V_ω Volumen der Probe, [cm³]

$$\rho_{12} = \rho_\omega \pm \frac{0,5}{100} \cdot |(12 - \omega)| \cdot \rho_\omega \quad \text{Gl. A-15}$$

mit: \pm „+“ für $\omega < 12 \%$, „-“ für $\omega > 12 \%$

$$\rho_{12} = \rho_0 \cdot \frac{100 + \omega}{100 + 0,85 \cdot \rho_0 \cdot \omega} \quad \text{Gl. A-16}$$

mit: ρ_{12} Rohdichte bei $\omega = 12 \%$, [g/cm³]
 ρ_0 Rohdichte im darrtrockenen Zustand, [g/cm³]
 ω Feuchtigkeitsgehalt, [%]

A 1.2.3 Ästigkeit

$$A = \max\left(\frac{d_i}{a}\right) \quad \text{Gl. A-17}$$

mit: A Ästigkeit, [-]
 d_i Astdurchmesser einschließlich Astrinde, bei ovalen Ästen der kleinste Durchmesser, bei Kantenästen Stichmaß von der Kante, wenn kleiner als Durchmesser, [mm]
 a Maß der Querschnittseite, auf der gemessen wurde, [mm]

A 1.2.4 Mittlere Jahrringbreite

$$B_{JR} = \left(\frac{l}{n_l} \right) \quad \text{Gl. A-18}$$

mit: B_{JR} mittlere Jahrringbreite, [mm]
 l Messstrecke, [mm]
 n_l Anzahl der auf der Messstrecke liegenden Jahrringe, [-]

A 1.2.5 Schwindrisse

$$R = \max \left(\frac{r_1 + r_2}{a} \right) \quad \text{Gl. A-19}$$

mit: R Risskriterium, [-]
 r_i Risstiefe an den Viertelpunkten der Risslänge, [mm]
 a Maß der Querschnittseite, [mm]

A 1.2.6 Faserneigung

$$F = \frac{x}{y} \cdot 100 \% \quad \text{Gl. A-20}$$

mit: F Faserneigung, [%]
 x Faserabweichung, [mm]
 y Messlänge parallel zur Balkenachse, [mm]

A 1.3 Festigkeits- und Elastizitätskennwerte

A 1.3.1 Widerstands- und Flächenmomente

- Flächenträgheitsmoment und Widerstandsmoment

$$I_y = \frac{b \cdot d^3}{12} \text{ bzw. } I_z = \frac{d \cdot b^3}{12} \quad \text{Gl. A-21}$$

$$W_y = \frac{b \cdot d^2}{6} \text{ bzw. } W_z = \frac{d \cdot b^2}{6} \quad \text{Gl. A-22}$$

mit:	I_y	Flächenträgheitsmoment, [m ⁴]
	W_y	Widerstandsmoment, [m ³]
	b	Querschnittsseite rechtwinklig zur Beanspruchung, [m]
	d	Querschnittsseite in Beanspruchungsrichtung, [m]

- Widerstandsmoment der Zugzone

$$W_u = \frac{I_y}{z_y} \quad \text{Gl. A-23}$$

mit:	W_u	Widerstandsmoment der Zugzone, [m ³]
	I_y	Flächenträgheitsmoment, [m ⁴]
	z_y	Randfaserabstand von der Nulllinie, [m]

A 1.3.2 Druckfestigkeit

$$\sigma_D = \frac{F_{\max}}{A} \quad \text{Gl. A-24}$$

mit:	σ_D	Druckfestigkeit bei vorhandenem Feuchtigkeitsgehalt, [N/mm ²]
	F_{\max}	Bruchkraft, [N]
	A	Querschnittsfläche, [mm ²]

$$\sigma_{D,12} = \sigma_D \cdot (1 + 0,04 \cdot (\omega_{\text{vorh.}} - 12)) \quad \text{Gl. A-25}^1$$

mit:	$\sigma_{D,12}$	Druckfestigkeit bei $\omega = 12 \%$, [N/mm ²]
	$\omega_{\text{vorh.}}$	vorhandener Feuchtigkeitsgehalt, [%]

¹ nach TGL 25106/06

A 1.3.3 Biegefestigkeit

$$\sigma_B = \frac{M_y}{W_y} \quad \text{Gl. A-26}$$

mit: σ_B Biegefestigkeit bei vorhandenem Feuchtigkeitsgehalt, [N/mm²]
 M_y Biegebruchmoment, [Nmm]
 W_y Widerstandsmoment, [mm³]

Bei rechteckigem Probenquerschnitt und auf zwei zur Feldmitte symmetrische Stellen verteilten Kraftangriff ergibt sich:

$$\sigma_B = \frac{3 \cdot F \cdot (l_s - l')}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad \text{Gl. A-27}$$

mit: F Bruchkraft, [N]
 l_s Stützweite, [mm]
 l' Abstand der Kraftangriffspunkte, [mm]
 b Probenbreite, [mm]
 h Probenhöhe, [mm]

$$\sigma_{B,12} = \sigma_B \cdot (1 + 0,04 \cdot (\omega_{\text{vorh.}} - 12)) \quad \text{Gl. A-28}^2$$

mit: $\sigma_{B,12}$ Biegefestigkeit bei $\omega = 12$ %, [N/mm²]
 $\omega_{\text{vorh.}}$ vorhandener Feuchtigkeitsgehalt, [%]

A 1.3.4 E-Modul

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \text{Gl. A-29}$$

mit: E Elastizitätsmodul, [N/mm²]
 σ Spannung im elastischen Bereich, [N/mm²]
 ε zugehörige Dehnung, [‰]

² nach TGL 25106/08

$$E_{B,12} = \frac{E_{\omega}}{1 - 0,01 \cdot (\omega_{\text{vorh.}} - 12)} \quad \text{Gl. A-30}^3$$

mit: $E_{B,12}$ Biege-Elastizitätsmodul bei $\omega = 12 \%$, [N/mm²]
 E_{ω} Biege-Elastizitätsmodul bei vorhandenem Feuchtigkeitsgehalt, [N/mm²]
 $\omega_{\text{vorh.}}$ vorhandener Feuchtigkeitsgehalt, [%]

A 1.3.5 Schlagbiegefestigkeit

$$w = \frac{1000 \cdot W}{b \cdot h} \quad \text{Gl. A-31}$$

mit: w Bruchschlagarbeit bzw. -festigkeit des Holzes, [KJ/m²]
 W Arbeit zum Durchschlagen der Probe, [J]
 b, h Querschnittsgeometrie der Probe, [mm]

$$w_{12} = w_{\omega} \cdot (1 + 0,02 \cdot (\omega_{\text{vorh.}} - 12)) \quad \text{Gl. A-32}^4$$

mit: w_{ω} Bruchschlagfestigkeit bei vorhandenem Feuchtigkeitsgehalt, [KJ/m²]
 $\omega_{\text{vorh.}}$ vorhandener Feuchtigkeitsgehalt, [%]

³ nach TGL 25106/11

⁴ nach TGL 25106/18

A 1.4 Ultraschall

A 1.4.1 Schallgeschwindigkeiten

$$v_L = \sqrt{\frac{1-\mu}{(1+\mu) \cdot (1-2\mu)}} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \text{Gl. A-33}$$

$$v_T = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot (1+\mu)}} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad \text{Gl. A-34}$$

$$v_D = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \text{Gl. A-35}$$

$$v_O = \frac{0,87 + 1,12\mu}{1+\mu} \sqrt{\frac{1}{2 \cdot (1+\mu)}} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \text{Gl. A-36}$$

mit:	v_L	Geschwindigkeit der Longitudinalwelle, [m/s]
	v_T	Geschwindigkeit der Transversalwelle, [m/s]
	v_D	Geschwindigkeit der Dehnwelle, [m/s]
	v_O	Geschwindigkeit der Oberflächenwelle, [m/s]
	μ	Poissonsche Konstante, [-], mit $\mu = \frac{\epsilon_{\text{quer}}}{\epsilon_{\text{längs}}}$
	ϵ	Dehnung, [‰]
	E	Elastizitätsmodul, [N/m ²]
	G	Schubmodul, [N/m ²]
	ρ	Rohdichte, [kg/m ³]

A 1.4.2 Wellenlänge

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad \text{Gl. A-37}$$

mit:	λ	Wellenlänge, [m]
	v	Geschwindigkeit der Schallwelle, [m/s]
	f	Frequenz, [Hz], Anzahl Schwingung je Sekunde

A 1.4.3 Ultraschallecho

$$v_{\text{ref}} = \frac{2 \cdot d_{\text{ref}}}{t_{\text{ref}}} \quad \text{Gl. A-38}$$

$$d_x = \frac{1}{2} \cdot v_{\text{ref}} \cdot t_x \quad \text{Gl. A-39}$$

mit: v_{ref} Schallgeschwindigkeit, Referenzwert, [m/s]
 d_{ref} durchschallte Bauteildicke, Referenzwert, [m]
 d_x Bauteildicke an der Stelle x, [m]
 t_{ref} Laufzeit des Schalls, Referenzwert, [s]
 t_x Laufzeit des Schalls für die Stelle x, [s]

A 1.5 Bohrwiderstand

$$I_{\text{BW}} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (x_{i+1} - x_i) \cdot \left(y_i + \frac{y_{i+1} - y_i}{2} \right)}{\sum_{i=1}^n x_i} \right] \quad \text{Gl. A-40}$$

mit: I_{BW} Bohrwiderstandsintegral, [%/mm]
 x_i Bohrweg, [mm]
 y_i Amplitude des Bohrwiderstandes, [%]

A 2 Verteilungskennwerte der Untersuchungsergebnisse

A 2.1 Ultraschallecho

Tab. A-1: Verteilungskennwerte der Rohdichte der Balken

Prüfkriterium ρ_{12} [g/cm ³]	n	\bar{x}	s	v [%]
Fichten-Neuholz	49	0,43	0,01	3
Fichten-Altholz, ungeschädigt	26	0,47	0,01	2
Fichten-Altholz, geschädigt	22	0,44	0,04	10
Kiefern-Neuholz	57	0,46	0,02	3
Kiefern-Altholz, ungeschädigt	29	0,54	0,01	2
Kiefern-Altholz, geschädigt	13	0,49	0,08	16
Lärchen-Neuholz	50	0,55	0,03	5

Tab. A-2: Verteilungskennwerte der Schallgeschwindigkeiten der Balken

Prüfkriterium v_{T-II} [m/s]	n	\bar{x}	s	v [%]
<u>55 kHz</u>				
Fichten-Neuholz	49	1095	62	6
Fichten-Altholz, ungeschädigt	9	1307	99	8
Kiefern-Neuholz	57	1183	81	7
Kiefern-Altholz, ungeschädigt	10	1322	24	2
Lärchen-Neuholz	45	1151	97	8
<u>35 kHz</u>				
Lärchen-Neuholz	5	1223	24	2
<u>30 kHz</u>				
Kiefern-Altholz, geschädigt	5	1367	25	2
<u>25 kHz</u>				
Fichten-Altholz, ungeschädigt	17	1477	74	5
Fichten-Altholz, geschädigt	22	1278	68	5
Kiefern-Altholz, ungeschädigt	19	1300	96	7
Kiefern-Altholz, geschädigt	8	1173	137	12

A 2.2 Bohrwiderstand

A 2.2.1 Holzprismen

Tab. A-3: Verteilungskennwerte der Ausgleichsfeuchte der Prüfprismen

Prüfkriterium $\omega_{65/20}$ [%]	n	\bar{x}	s	v [%]
Fichten-Neuholz	294	12,3	0,77	6
Fichten-Altholz, ungeschädigt	122	11,9	1,46	12
Fichten-Altholz, geschädigt	64	9,3	1,25	14
Kiefern-Neuholz	233	12,0	1,03	9
Kiefern-Altholz, ungeschädigt	61	9,6	0,56	6
Kiefern-Altholz, geschädigt	95	10,7	0,97	9

Tab. A-4: Verteilungskennwerte der Rohdichte der Prüfprismen

Prüfkriterium ρ_{12} [g/cm³]	n	\bar{x}	s	v [%]
Fichten-Neuholz	698	0,44	0,04	8
Fichten-Altholz, ungeschädigt	383	0,46	0,03	8
Fichten-Altholz, geschädigt	42	0,42	0,03	8
Kiefern-Neuholz	522	0,46	0,05	10
Kiefern-Altholz, ungeschädigt	26	0,51	0,03	6
Kiefern-Altholz, geschädigt	207	0,38	0,04	11

Tab. A-5: Verteilungskennwerte des Bohrwiderstandes der Prüfprismen

Prüfkriterium l_{BW} [%/mm]	n	\bar{x}	s	v [%]
Fichten-Neuholz	743	12,0	3,5	30
Fichten-Altholz, ungeschädigt	404	15,0	3,3	22
Fichten-Altholz, geschädigt	44	13,4	2,5	19
Kiefern-Neuholz	571	11,9	4,0	34
Kiefern-Altholz, ungeschädigt	28	16,0	3,3	34
Kiefern-Altholz, geschädigt	233	7,0	3,7	52

Tab. A-6: Verteilungskennwerte des Bohrwiderstandes der Prüfprismen in Abhängigkeit von der Prüfrichtung

Prüfkriterium I_{BW} [%/mm]	n	\bar{x}	s	v [%]
	radial	radial	radial	radial
	tangential	tangential	tangential	tangential
	radial/tangential	radial/tangential	radial/tangential	radial/tangential
Fichten-Neuholz	246	12,3	3,2	26
	233	11,4	4,0	35
	265	12,4	3,5	28
Fichten-Altholz, ungeschädigt	175	14,1	2,9	20
	116	15,0	3,8	25
	113	16,2	3,1	19
Fichten-Altholz, geschädigt	15	13,2	1,7	13
	15	13,8	2,6	19
	14	13,2	3,2	25
Kiefern-Neuholz	196	13,6	3,9	28
	193	10,3	4,0	39
	182	11,8	3,4	29
Kiefern-Altholz, ungeschädigt	9	16,5	2,3	14
	9	13,9	4,3	31
	10	17,4	2,0	12
Kiefern-Altholz, geschädigt	72	9,1	3,4	37
	72	6,7	4,0	60
	89	5,6	2,7	49

Tab. A-7: Verteilungskennwerte des Bohrwiderstandes der Prüfprismen in Abhängigkeit von der Prüfrichtung und Rohdichte

Prüfkriterium $I_{BW\omega}$ [%/mm]	n	\bar{x}	s	v [%]
	ges	ges	ges	ges
	radial	radial	radial	radial
	tangential	tangential	tangential	tangential
Fichten-Neuholz, $\rho_{12\text{-Klasse}} = 0,44 - 0,45 \text{ g/cm}^3$	tangential/radial	tangential/radial	tangential/radial	tangential/radial
	154	12,4	1,8	15
	51	12,4	1,5	12
	52	12,0	1,9	15
Fichten-Altholz, ungeschädigt, $\rho_{12\text{-Klasse}} = 0,45 - 0,46 \text{ g/cm}^3$	51	12,7	1,9	15
	120	15,8	2,9	18
	45	15,1	2,8	19
	40	16,6	2,8	17
	35	15,9	2,9	18
Fortsetzung von Tab. A-7 auf der nächsten Seite				

Prüfkriterium $I_{BW\omega}$ [%/mm]	n	\bar{x}	s	v [%]
	ges	ges	ges	ges
	radial	radial	radial	radial
	tangential	tangential	tangential	tangential
	tangential/radial	tangential/radial	tangential/radial	tangential/radial
Kiefern-Neuholz, $\rho_{12}\text{-Klasse} = 0,47 - 0,48 \text{ g/cm}^3$	114	14,1	3,4	24
	46	15,9	2,8	18
	47	12,6	3,1	24
	21	13,5	3,5	26
Kiefern-Altholz, geschädigt, $\rho_{12}\text{-Klasse} = 0,38 - 0,39 \text{ g/cm}^3$	66	8,2	3,1	38
	22	10,4	2,6	25
	22	7,4	3,6	49
	22	6,8	1,6	24

Tab. A-8: Verteilungskennwerte der Regressionsanalyse des Bohrwiderstandes und der Rohdichte der Prüfrispen in Abhängigkeit von der Prüfrichtung bei $\omega = 12\%$

Zielgröße I_{BW12} [%/mm]	Regressionsansatz mit beeinflussender Variablen	n	r_{xy}
	ges	ges	ges
	radial	radial	radial
	tangential	tangential	tangential
	radial/tangential	radial/tangential	radial/tangential
Fichten-Neuholz	$I_{BW12} = 68,2 \rho_{12FIN} - 18,1$	698	0,71
	$I_{BW12} = 54,7 \rho_{12FINr} - 11,7$	224	0,65
	$I_{BW12} = 73,4 \rho_{12FINt} - 20,8$	217	0,73
	$I_{BW12} = 77,7 \rho_{12FINtr} - 22,4$	257	0,77
Fichten-Altholz, ungeschädigt	$I_{BW12} = 41,6 \rho_{12FIA} - 4,3$	384	0,38
	$I_{BW12} = 30,7 \rho_{12FIAr} -$	174	0,37
	$I_{BW12} = 53,4 \rho_{12FIAt} - 9,5$	109	0,42
	$I_{BW12} = 49,1 \rho_{12FIATR} - 6,7$	101	0,36
Kiefern-Neuholz	$I_{BW12} = 52,0 \rho_{12KIN} - 12,0$	522	0,59
	$I_{BW12} = 49,8 \rho_{12KINr} - 9,2$	178	0,63
	$I_{BW12} = 52,2 \rho_{12KINt} - 13,5$	179	0,63
	$I_{BW12} = 57,7 \rho_{12KINtr} - 15,1$	165	0,61
Kiefern-Altholz, ungeschädigt	$I_{BW12} = 54,7 \rho_{12KIA} - 12,0$	26	0,55
	$I_{BW12} = 35,5 \rho_{12KIAR} - 1,6$	8	0,65
	$I_{BW12} = 44,0 \rho_{12KIAT} - 8,3$	8	0,33
	$I_{BW12} = 67,0 \rho_{12KIATR} - 18,0$	10	0,81
Kiefern-Altholz, geschädigt	$I_{BW12} = 50,7 \rho_{12KIG} - 12,0$	207	0,55
	$I_{BW12} = 50,3 \rho_{12KIGr} - 9,9$	65	0,54
	$I_{BW12} = 62,4 \rho_{12KIGt} - 17,0$	65	0,54
	$I_{BW12} = 36,1 \rho_{12KIGtr} - 7,8$	77	0,64

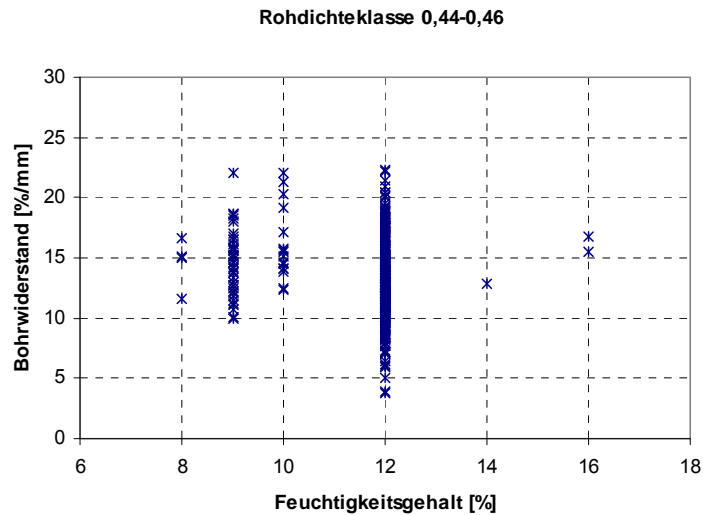


Abb. A-1: Bohrwiderstand und Feuchtigkeitsgehalt aller Prismen innerhalb der Rohdichteklasse von 0,44 bis 0,46 g/cm³

A 2.2.2 Balken

Tab. A-9: Verteilungskennwerte der Rohdichte der Balken

Prüfkriterium ρ_{12} [g/cm ³]	n	\bar{x}	s	v [%]
Fichten-Neuholz	101	0,43	0,01	3
Fichte/Tannen-Altholz, ungeschädigt	179	0,43	0,03	12
Fichten/Tannen-Altholz, geschädigt	195	0,40	0,05	12
Kiefern-Neuholz	87	0,46	0,02	4
Kiefern-Altholz, ungeschädigt	95	0,53	0,02	3
Kiefern-Altholz, geschädigt	106	0,49	0,09	18
Lärchen-Neuholz	77	0,55	0,03	6

Tab. A-10: Verteilungskennwerte des Bohrwiderstandes der Prüfbalken

Prüfkriterium I_{BW} [%/mm]	n	\bar{x}	s	v [%]
Fichten-Neuholz	101	12,0	2,8	23
Fichten-Altholz, ungeschädigt	179	16,5	4,0	24
Fichten-Altholz, geschädigt	194	16,7	5,0	30
Kiefern-Neuholz	87	11,9	3,3	28
Kiefern-Altholz, ungeschädigt	95	18,1	4,7	26
Kiefern-Altholz, geschädigt	101	12,0	6,7	56
Lärchen-Neuholz	78	20,7	4,8	23

Tab. A-11: Verteilungskennwerte des Bohrwiderstandes der Prüfbalken nach Rohdichtegruppierung sich überschneidender Klassen

Prüfkriterium I_{BW} [%/mm]	n	\bar{x}	s	v [%]
Fichten-Neuholz	167	11,6	2,2	19
Fichten/Tannen-Altholz, ungeschädigt	299	16,3	3,4	22
Fichten-Altholz, geschädigt	365	18,3	4,0	23
Kiefern-Neuholz	130	12,5	3,0	24
Kiefern-Altholz, ungeschädigt	127	18,0	4,8	26
Kiefern-Altholz, geschädigt	114	10,9	2,8	30
Lärchen-Neuholz	116	21,4	3,1	15

Tab. A-12: Verteilungskennwerte des Bohrwiderstandes der Prüfbalken in Abhängigkeit von den Querschnittszonen mit Angabe der Variationskoeffizienten vor und nach Rohdichtegruppierung

Prüfkriterium I_{BW} [%/mm]	n	\bar{x}	s	V vor Rohdichte- gruppierung [%]	V nach Rohdichte- gruppierung [%]
	Zone 1	Zone 1	Zone 1	Zone 1	Zone 1
	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 2
	Zone 3	Zone 3	Zone 3	Zone 3	Zone 3
	Zone 4	Zone 4	Zone 4	Zone 4	Zone 4
Fichten-Neuholz	22	11,0	2,9	26	12
	32	11,3	2,5	22	21
	32	12,4	2,9	23	15
	15	14,0	1,8	13	12
Fichten-Altholz, ungeschädigt	33	15,0	3,8	25	16
	46	16,0	4,0	25	18
	30	17,5	3,1	18	16
	4	22,6	3,5	15	15
Tannen-Altholz, ungeschädigt	16	15,3	3,1	20	mit Fichte- Altholz, ungeschädigt zusammengefasst
	20	15,9	4,4	28	
	30	17,9	4,2	24	
	0	-	-	-	
Fichten-Altholz, geschädigt	44	15,2	4,7	31	24
	94	16,4	4,8	29	22
	46	18,6	5,2	28	20
	10	15,8	4,4	28	16
Kiefern-Neuholz	21	9,6	2,3	24	11
	28	11,1	2,8	25	20
	21	12,3	2,9	24	19
	17	15,5	2,6	17	12
Fortsetzung von Tab. A-12 auf der nächsten Seite					

Prüfkriterium I_{BW} [%/mm]	n	\bar{x}	s	V vor Rohdichte- gruppierung [%]	V nach Rohdichte- gruppierung [%]
	Zone 1	Zone 1	Zone 1	Zone 1	Zone 1
	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 2
	Zone 3	Zone 3	Zone 3	Zone 3	Zone 3
	Zone 4	Zone 4	Zone 4	Zone 4	Zone 4
Kiefern-Altholz, ungeschädigt	19	15,1	3,8	25	24
	30	16,9	3,1	18	17
	29	18,7	2,6	14	14
	16	23,4	6,6	28	28
Kiefern-Altholz, geschädigt	23	9,9	5,3	54	28
	32	11,1	6,8	61	32
	24	11,9	7,1	60	37
	22	15,9	6,2	39	20
Lärchen-Neuholz	17	18,5	4,5	24	10
	25	20,6	4,5	22	15
	20	21,0	4,9	23	12
	15	22,9	5,3	23	13

A 2.3 Druckprüfung

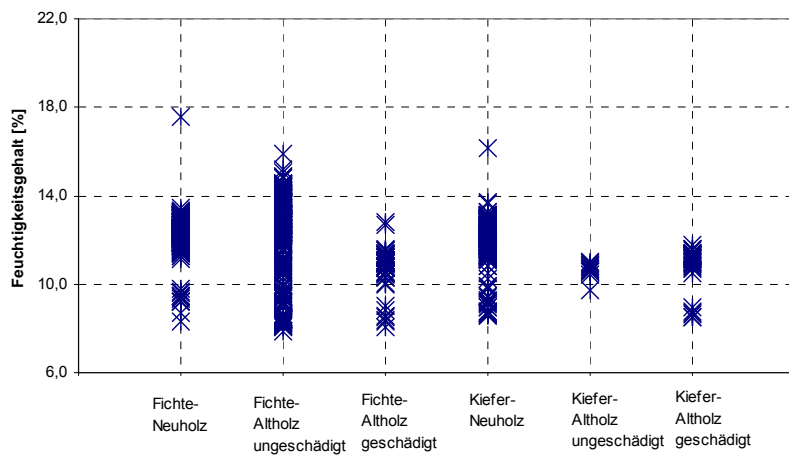


Abb. A-2: Feuchtigkeitsverteilung der Druckprismen innerhalb der Prüfkategorien

Tab. A-13: Verteilungskennwerte der Ausgleichsfeuchte der Druckprismen

Prüfkriterium $\omega_{65/20}$ [%]	n	\bar{x}	s	v [%]
Fichten-Neuholz	295	12,3	0,83	7
Fichten-Altholz, ungeschädigt	304	12,0	2,01	17
Fichten-Altholz, geschädigt	57	10,7	0,97	9
Kiefern-Neuholz	234	12,0	1,06	9
Kiefern-Altholz, ungeschädigt	11	10,6	0,35	3
Kiefern-Altholz, geschädigt	38	10,8	0,97	9

Tab. A-14: Verteilungskennwerte der Rohdichte der Druckprismen

Prüfkriterium ρ_{12} [g/cm ³]	n	\bar{x}	s	v [%]
Fichten-Neuholz	295	0,46	0,04	8
Fichten-Altholz, ungeschädigt	304	0,46	0,04	9
Fichten-Altholz, geschädigt	57	0,39	0,05	12
Kiefern-Neuholz	234	0,49	0,05	10
Kiefern-Altholz, ungeschädigt	11	0,53	0,04	8
Kiefern-Altholz, geschädigt	38	0,38	0,03	8

Tab. A-15: Verteilungskennwerte der Druckfestigkeit der Prüfprismen in Abhängigkeit von der Rohdichte bei $\varphi = 12\%$

Zielgröße σ_{D12} [N/mm ²]	Regressionsansatz mit beeinflussender Variablen	n	r_{xy}
Nadelhölzer- gesamt	$\sigma_{D12} = 115,1 \rho_{12} - 9,3$	939	0,76
Fichte- gesamt	$\sigma_{D12} = 91,7 \rho_{12} + 4,0$	656	0,59
Fichten-Neuholz	$\sigma_{D12} = 127,6 \rho_{12} - 9,7$	295	0,77
Fichten-Altholz ungeschädigt	$\sigma_{D12} = 71,1 \rho_{12} + 11,2$	304	0,54
Fichten-Altholz geschädigt	$\sigma_{D12} = 115,4 \rho_{12} - 13,4$	57	0,71
Kiefer- gesamt	$\sigma_{D12} = 112,2 \rho_{12} - 9,0$	283	0,79
Kiefern-Neuholz	$\sigma_{D12} = 105,5 \rho_{12} - 6,0$	234	0,72
Kiefern-Altholz ungeschädigt	$\sigma_{D12} = 67,5 \rho_{12} + 16,1$	11	0,44
Kiefern-Altholz geschädigt	$\sigma_{D12} = 219,8 \rho_{12} - 48,7$	38	0,84

Tab. A-16: Verteilungskennwerte der Rohdichte der Druckprismen aus den Schadenszonen mit $\varphi = 12\%$

Prüfkriterium ρ_{12} [g/cm ³]	n	\bar{x}	s	v [%]
Nadelhölzer- gesamt				
<u>Schadenszone 1</u>	793	0,45	0,04	9
<u>Schadenszone 2</u>	65	0,40	0,05	11
<u>Schadenszone 3</u>	22	0,34	0,06	16
Fichte- gesamt				
<u>Schadenszone 1</u>	529	0,45	0,04	8
<u>Schadenszone 2</u>	10	0,43	0,05	13
<u>Schadenszone 3</u>	1	0,34	-	-
Kiefer- gesamt				
<u>Schadenszone 1</u>	264	0,46	0,05	11
<u>Schadenszone 2</u>	55	0,39	0,04	11
<u>Schadenszone 3</u>	21	0,34	0,06	16

Tab. A-17: Verteilungskennwerte der Druckfestigkeit der Prismen aus den Schadenszonen
mit $\varphi = 12\%$

Prüfkriterium σ_{D12} [N/mm ²]	n	\bar{x}	s	v [%]
Nadelhölzer- gesamt				
<u>Schadenszone 1</u>	793	44,6	6,1	14
<u>Schadenszone 2</u>	65	34,7	5,6	16
<u>Schadenszone 3</u>	22	22,3	10,0	45
Fichte- gesamt				
<u>Schadenszone 1</u>	529	45,5	5,6	12
<u>Schadenszone 2</u>	10	36,9	7,7	21
<u>Schadenszone 3</u>	1	25,4	-	-
Kiefer- gesamt				
<u>Schadenszone 1</u>	264	42,8	6,8	16
<u>Schadenszone 2</u>	55	34,3	5,1	15
<u>Schadenszone 3</u>	21	22,2	10,3	46

A 2.4 Biegeprüfung

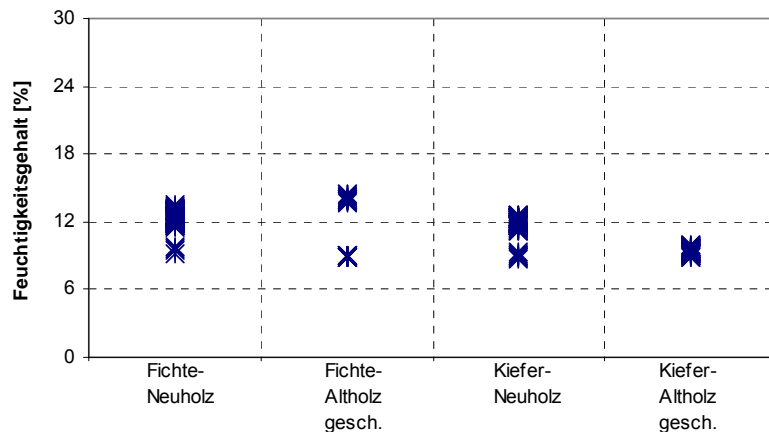


Abb. A-3: Feuchtigkeitsgehalte der Biegeprismen der Prüfkategorien

Tab. A-18: Verteilungskennwerte des Feuchtigkeitsgehaltes der Biegeprismen

Prüfkriterium ω [%]	n	\bar{x}	s	v [%]
Fichten-Neuholz	96	12,4	0,73	6
Fichten-Altholz, geschädigt	34	11,1	2,55	23
Kiefern-Neuholz	90	11,8	0,88	7
Kiefern-Altholz, geschädigt	48	9,4	0,28	3

Tab. A-19: Verteilungskennwerte der Rohdichte der Biegeprismen mit $\omega = 12$ %

Prüfkriterium ρ_{12} [g/cm³]	n	\bar{x}	s	v [%]
Fichten-Neuholz	96	0,43	0,04	8
Fichten-Altholz, geschädigt	34	0,43	0,03	6
Kiefern-Neuholz	90	0,46	0,04	10
Kiefern-Altholz, geschädigt	48	0,50	0,06	12

Tab. A-20: Verteilungskennwerte der Prismen mit $\omega = 12$ %

Prüfkriterium [N/mm²]	n	\bar{x}	s	v [%]
Fichte gesamt				
σ	122	70,9	19,7	28
E-Modul	122	10.916	2.588	24
Fichten-Neuholz				
σ	88	75,8	19,4	26
E-Modul	88	11.463	2.631	23
Fichten-Altholz, geschädigt				
σ	34	58,4	14,4	25
E-Modul	34	9.500	1.855	20
Fortsetzung von Tab. A-20 auf der nächsten Seite				

Prüfkriterium [N/mm ²]	n	\bar{x}	s	v [%]
Kiefer gesamt				
σ	135	65,1	16,8	26
E-Modul	135	9.336	2.436	26
Kiefern-Neuholz				
σ	87	68,8	15,9	23
E-Modul	87	9.925	2.438	25
Kiefern-Altholz, geschädigt				
σ	48	58,4	16,5	28
E-Modul	48	8.268	2.059	25

Tab. A-21: Verteilungskennwerte der Biegefestigkeit der Prismen in Abhängigkeit von der Rohdichte

Zielgröße σ_{B12} [N/mm ²]	Regressionsansatz mit beeinflussender Variablen	n	r_{xy}
Fichte gesamt	$\sigma_{B12} = 221,3 \rho_{12} - 25,2$	122	0,37
Fichten-Neuholz	$\sigma_{B12} = 255,6 \rho_{12} - 35,3$	88	0,46
Fichten-Altholz, geschädigt	kein Zusammenhang	34	-
Kiefer gesamt	$\sigma_{B12} = 115,4 \rho_{12} + 10,5$	135	0,36
Kiefern-Neuholz	$\sigma_{B12} = 243,6 \rho_{12} - 43,1$	87	0,66
Kiefern-Altholz, geschädigt	$\sigma_{B12} = 90,6 \rho_{12} + 13,4$	48	0,32

Tab. A-22: Verteilungskennwerte aller geprüften Prismen aus den Schadenszonen mit $\omega = 12\%$

Prüfkriterium [N/mm ²]	n	\bar{x}	s	v [%]
<u>Schadenszone 1</u>				
σ	212	71,6	16,7	23
E-Modul	212	10.567	2.495	24
<u>Schadenszone 2</u>				
σ	21	56,0	10,5	19
E-Modul	21	8.344	1.897	23
<u>Schadenszone 3</u>				
σ	24	45,0	18,0	40
E-Modul	24	7.361	1.970	27

Tab. A-23: Verteilungskennwerte der Biegefestigkeit und des E-Moduls der Prismen
bei $\varphi = 12\%$

Prüfkriterium [N/mm ²]	n	\bar{x}	s	v [%]
<u>Fichten-Neuholz</u>				
<u>Schadenszone 1</u>				
σ	88	75,8	19,4	26
E-Modul	88	11.463	2.631	23
<u>Fichten-Altholz</u>				
<u>Schadenszone 1</u>				
σ	20	67,2	6,1	9
E-Modul	20	10.437	910	9
<u>Schadenszone 2</u>				
σ	9	53,5	8,0	15
E-Modul	9	9.288	1223	13
<u>Schadenszone 3</u>				
σ	5	32,0	9,5	30
E-Modul	5	6.138	1.691	28
<u>Kiefern-Neuholz</u>				
<u>Schadenszone 1</u>				
σ	87	68,8	15,9	23
E-Modul	87	9.925	2.437	25
<u>Kiefern-Altholz</u>				
<u>Schadenszone 1</u>				
σ	17	69,8	8,4	12
E-Modul	17	9.368	1.820	19
<u>Schadenszone 2</u>				
σ	12	57,8	12,0	21
E-Modul	12	7.636	2.045	27
<u>Schadenszone 3</u>				
σ	19	48,5	18,3	38
E-Modul	19	7.683	1.949	25

Tab. A-24: Verteilungskennwerte des Biegefestigkeit der Prüfprismen in Abhängigkeit vom E-Modul der Schadenszonen

Zielgröße σ_{B12} [N/mm ²]	Regressionsansatz mit beeinflussender Variablen	n	r_{xy}
Fichte + Kiefer <u>Schadenszone 1</u>	$\sigma_{B12} = 0,0058 E_{12} + 10,6$	212	0,86
Fichte <u>Schadenszone 1</u>	$\sigma_{B12} = 0,0029 E_{12} + 36,9$	108	0,43
Kiefer <u>Schadenszone 1</u>	$\sigma_{B12} = 0,0053 E_{12} + 17,2$	104	0,83
Fichte + Kiefer <u>Schadenszone 2</u>	$\sigma_{B12} = 0,0028 E_{12} + 32,4$	21	0,51
Fichte <u>Schadenszone 2</u>	$\sigma_{B12} = 0,0022 E_{12} + 33,3$	9	0,33
Kiefer <u>Schadenszone 2</u>	$\sigma_{B12} = 0,0046 E_{12} + 22,3$	12	0,79
Fichte + Kiefer <u>Schadenszone 3</u>	$\sigma_{B12} = 0,0058 E_{12} + 2,1$	24	0,64
Fichte <u>Schadenszone 3</u>	$\sigma_{B12} = 0,0041 E_{12} + 6,7$	5	0,73
Kiefer <u>Schadenszone 3</u>	$\sigma_{B12} = 0,0055 E_{12} + 6,6$	19	0,58

A 2.5 Schlagbiegeprüfung

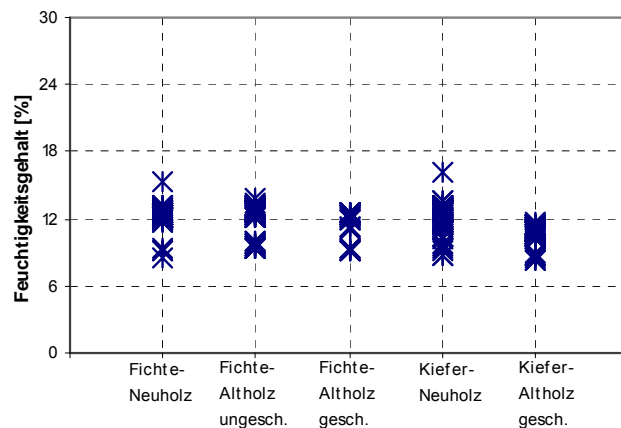


Abb. A-4: Feuchtigkeitsverteilung der Schlagbiegeprismen innerhalb der Prüfkategorien

Tab. A-25: Verteilungskennwerte des Feuchtigkeitsgehaltes der Schlagbiegeprismen

Prüfkriterium ω [%]	n	\bar{x}	s	v [%]
Fichten-Neuholz	94	12,3	0,82	7
Fichten-Altholz, ungeschädigt	70	12,2	1,22	10
Fichten-Altholz, geschädigt	25	11,4	1,34	12
Kiefern-Neuholz	96	12,2	1,09	9
Kiefern-Altholz, geschädigt	77	10,8	0,77	7

Tab. A-26: Verteilungskennwerte der Rohdichte der Schlagbiegeprismen

Prüfkriterium ρ_{12} [g/cm³]	n	\bar{x}	s	v [%]
Fichten-Neuholz	94	0,45	0,03	7
Fichten-Altholz, ungeschädigt	70	0,47	0,02	5
Fichten-Altholz, geschädigt	25	0,44	0,05	11
Kiefern-Neuholz	96	0,46	0,05	10
Kiefern-Altholz, geschädigt	77	0,40	0,06	16

Tab. A-27: Verteilungskennwerte der Bruchschlagarbeit der Prismen

Prüfkriterium w_{12} [KJ/m²]	n	\bar{x}	s	v [%]
Fichten-Neuholz	94	65,2	15,5	24
Fichten-Altholz, ungeschädigt	70	50,8	23,2	46
Fichten-Altholz, geschädigt	25	43,1	11,2	26
Kiefern-Neuholz	96	41,5	13,9	33
Kiefern-Altholz, geschädigt	77	26,5	16,0	61

Tab. A-28: Verteilungskennwerte der Bruchschlagarbeit in Abhängigkeit von der Rohdichte
bei $\omega = 12\%$

Zielgröße w_{12} [N/mm ²]	Regressionsansatz mit beeinflussender Variablen	n	r_{xy}
Fichte- gesamt (ohne Fichten-Altholz, ungeschädigt)	$w_{12} = 255,8 \rho_{12} - 53,4$	119	0,54
Fichten-Neuholz	$w_{12} = 312,7 \rho_{12} - 74,1$	94	0,68
Fichten-Altholz, ungeschädigt	-	70	-
Fichten-Altholz, geschädigt	$w_{12} = 123,5 \rho_{12} - 12,1$	25	0,51
Kiefer- gesamt	$w_{12} = 181,2 \rho_{12} - 44,0$	173	0,69
Kiefern-Neuholz	$w_{12} = 172,3 \rho_{12} - 38,0$	96	0,58
Kiefern-Altholz, geschädigt	$w_{12} = 148,1 \rho_{12} - 33,1$	77	0,58

Tab. A-29: Verteilungskennwerte der Rohdichte der Schlagbiegeprismen der jeweiligen
Schadenszonen bei $\omega = 12\%$

Prüfkriterium ρ_{12} [g/cm ³]	n	\bar{x}	s	v [%]
<u>Schadenszone 1</u>	294	0,45	0,05	11
<u>Schadenszone 2</u>	48	0,40	0,05	12
<u>Schadenszone 2</u>	20	0,38	0,06	17

Tab. A-30: Verteilungskennwerte der Bruchschlagarbeit der Prismen der jeweiligen
Schadenszonen bei $\omega = 12\%$

Prüfkriterium w_{12} [KJ/m ²]	n	\bar{x}	s	v [%]
Fichte				
alle Prüfkörper	25	43,1	11,2	26
<u>Schadenszone 1</u>	17	47,7	10,0	21
<u>Schadenszone 2</u>	5	34,3	5,7	17
<u>Schadenszone 3</u>	3	28,3	5,5	19
Kiefer				
alle Prüfkörper	77	26,5	16,0	61
<u>Schadenszone 1</u>	20	42,3	16,7	40
<u>Schadenszone 2</u>	40	24,6	7,8	32
<u>Schadenszone 3</u>	17	9,2	6,1	67

Tab. A-31: Verteilungskennwerte der Bruchschlagarbeit in Abhängigkeit von der Rohdichte
bei $\omega = 12\%$

Zielgröße w_{12} [KJ/m ²]	Regressionsansatz mit beeinflussender Variablen	n	r_{xy}
Kiefer			
<u>Schadenszone 1</u>	$w_{12} = 135,1 \rho_{12} - 15,1$	20	0,66
<u>Schadenszone 2</u>	$w_{12} = 75,6 \rho_{12} - 5,2$	40	0,45
<u>Schadenszone 3</u>	$w_{12} = 62,5 \rho_{12} - 14,2$	17	0,59

A 2.6 Kombination der Einzeluntersuchungen

A 2.6.1 Regression 1. Grades

Prismen Bohrwiderstand

Tab. A-32: Verteilungskennwerte der Druckfestigkeit der Prismen in Abhängigkeit vom Bohrwiderstand

Zielgröße σ_{D12} [N/mm ²]	Regressionsansatz mit unabhängiger Variable I_{BW}	n	r_{xy}
Nadelholz- gesamt	$\sigma_{D12} = 1,16 I_{BW} + 29,1$	1.679	0,62
	$\sigma_{D12} = 12,23 \ln(I_{BW}) + 13,6$		0,69

Tab. A-33: Verteilungskennwerte der Biegefestigkeit und des E-Moduls der Prismen in Abhängigkeit vom Bohrwiderstand

Zielgröße σ_{B12} [N/mm ²]	Regressionsansatz mit unabhängiger Variable I_{BW}	n	r_{xy}
Nadelholz- gesamt	$\sigma_{B12} = 3,00 I_{BW} + 37,4$	190	0,51
E_{12} [N/mm ²]			
Nadelholz- gesamt	$E_{12} = 498,4 I_{BW} + 4.918$	190	0,57

Tab. A-34: Verteilungskennwerte der Bruchschlagarbeit der Prismen in Abhängigkeit vom Bohrwiderstand

Zielgröße w_{12} [kJ/m ²]	Regressionsansatz mit unabhängiger Variable I_{BW}	n	r_{xy}
Nadelholz- gesamt	$w_{12} = 2,32 I_{BW} + 17,5$	372	0,45
	$w_{12} = 25,5 \ln(I_{BW}) - 15,9$		0,51
Fichten-Neuholz	$w_{12} = 3,38 I_{BW} + 23,5$	96	0,67
Fichten-Altholz, geschädigt und ungeschädigt	-	48+54	< 0,25
Kiefern-Neuholz	$w_{12} = 2,10 I_{BW} + 16,8$	97	0,54
Kiefern-Altholz, ungeschädigt	-	12	< 0,25
Kiefern-Altholz, geschädigt	$w_{12} = 2,54 I_{BW} + 4,36$	65	0,73

Balken Bohrwiderstand

Tab. A-35: Verteilungskennwerte der Biegefestigkeit der Balken in Abhängigkeit vom Bohrwiderstand

Zielgröße σ_{B12} [N/mm ²]	Regressionsansatz mit unabhängiger Variable I_{BW}	n	r_{xy}
Nadelholz- gesamt	$\sigma_{B12} = 1,06 I_{BW} + 10,4$	30	0,51

A 2.6.2 Multiple Regression

Prismen Bohrwiderstand

Tab. A-36: Ergebnisse der multiplen Regression der Bohrwiderstandsprismen für die Druckfestigkeit

<u>abhängige Variable: σ_{D12} [g/cm³]</u>
unabhängige Variablen: ω [%]; ρ_{12} [g/cm ³]; I_{BW} [%/mm]
alle Nadelholzprismen: $\sigma_{D12} = 0,68 \omega + 98,9 \rho_{12} + 0,47 I_{BW} - 14,1$ n = 1.579, $r_m = 0,77$ (Vergleich: $r_{xy1.Grades} = 0,62/0,69$)
Fichte- alle: $\sigma_{D12} = 0,90 \omega + 100,9 \rho_{12} + 0,05 I_{BW} - 10,4$ n = 902, $r_m = 0,61$
Fichten-Neuholz: $\sigma_{D12} = 0,29 \omega + 110,6 \rho_{12} + 0,21 I_{BW} - 8,3$ n = 582, $r_m = 0,76$
Fichten-Altholz, ungeschädigt: $\sigma_{D12} = -0,09 \omega - 54,9 \rho_{12} + 0,57 I_{BW} + 61,9$ n = 102, $r_m = 0,56$
Fichten-Altholz, geschädigt: $\sigma_{D12} = 0,91 \omega + 115,5 \rho_{12} - 0,08 I_{BW} - 16,3$ n = 218, $r_m = 0,63$
Kiefer- alle: $\sigma_{D12} = 0,01 \omega + 106,0 \rho_{12} - 0,43 I_{BW} - 11,2$ n = 677, $r_m = 0,87$
Kiefern-Neuholz: $\sigma_{D12} = -0,05 \omega + 99,6 \rho_{12} + 0,36 I_{BW} - 6,7$ n = 450, $r_m = 0,79$
Kiefern-Altholz, ungeschädigt: $\sigma_{D12} = -3,4 \omega + 102,0 \rho_{12} - 0,41 I_{BW} + 44,8$ n = 22, $r_m = 0,56$
Kiefern-Altholz, geschädigt: $\sigma_{D12} = 0,20 \omega + 106,3 \rho_{12} + 0,65 I_{BW} - 15,6$ n = 205, $r_m = 0,76$

Tab. A-37: Ergebnisse der multiplen Regression der Bohrwiderstandsprismen für die Biegefestigkeit und den E-Modul

abhängige Variable: σ_{B12} [g/cm³]
unabhängige Variablen: ω [%]; ρ_{12} [g/cm ³]; I_{BW} [%/mm]
alle Nadelholzprismen: $\sigma_{B12} = 1,78 \omega + 124,2 \rho_{12} + 1,40 I_{BW} - 19,7$ n = 646, $r_m = 0,51$ (Vergleich: $r_{xy1.Grades} = 0,51$)
Fichten-Neuholz: $\sigma_{B12} = -1,93 \omega + 235,9 \rho_{12} + 0,38 I_{BW} - 7,5$ n = 336, $r_m = 0,49$
Kiefern-Neuholz: $\sigma_{B12} = 2,08 \omega + 173,0 \rho_{12} + 0,94 I_{BW} + 0,2$ n = 310, $r_m = 0,66$
abhängige Variable: E_{12} [g/cm³]
unabhängige Variablen: ω [%]; ρ_{12} [g/cm ³]; I_{BW} [%/mm]
alle Nadelholzprismen: $E_{12} = 176,1 \omega + 13.097 \rho_{12} + 300,5 I_{BW} - 584$ n = 646, $r_m = 0,56$ (Vergleich: $r_{xy1.Grades} = 0,57$)
Fichten-Neuholz: $E_{12} = -363,0 \omega + 32.870 \rho_{12} + 102,5 I_{BW} + 428$ n = 336, $r_m = 0,58$
Kiefern-Neuholz: $E_{12} = 186,6 \omega + 23.203 \rho_{12} + 227,3 I_{BW} - 119$ n = 310, $r_m = 0,70$

Balken-Ultraschall

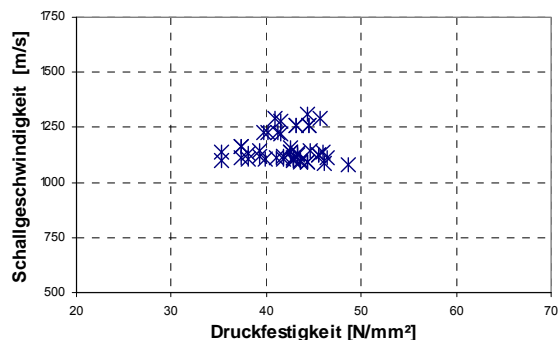


Abb. A-5: Darstellung von Schallgeschwindigkeit und Druckfestigkeit

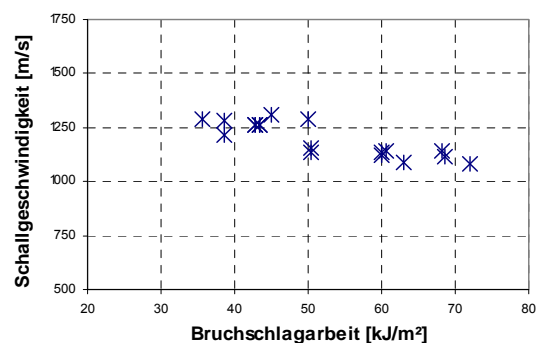


Abb. A-6: Darstellung von Schallgeschwindigkeit und Bruchschlagarbeit

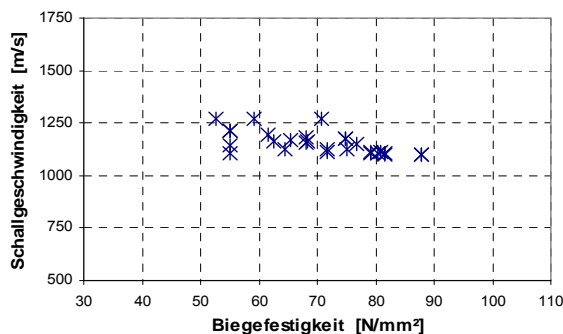


Abb. A-7: Darstellung von Schallgeschwindigkeit und Biegefestigkeit

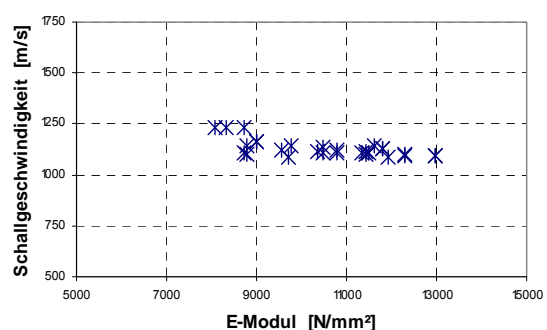


Abb. A-8: Darstellung von Schallgeschwindigkeit und E-Modul

Balken Bohrwiderstand

Tab. A-38: Ergebnisse der multiplen Regression der Balken für die Biegefestigkeit

abhängige Variable: σ_{B12} [g/cm³] unabhängige Variablen: ω [Feuchtigkeitsgehalt in %]; I_{BW} [Bohrwiderstand in %/mm]; Qz [Querschnittszone]; ρ_{12} [Rohdichte in g/cm ³]; A [Ästigkeit der Zugseite]
alle Nadelholzprismen S_{R10}: $\sigma_{B12} = -0,13 \omega + 0,41 I_{BW} - 0,29 Qz + 152,3 \rho_{12} - 63,9 A - 33,7$ S_{R7} : $\sigma_{B12} = -0,13 \omega + 0,41 I_{BW} - 0,29 Qz + 152,3 \rho_{12} - 63,9 A - 23,0$ n = 229 (Messungen an 21 Balken), $r_m = 0,74$ $F_{Tab.} = 2,01 > F_{exp.} = 1,90 \rightarrow$ Adäquatheit $f_{5\%}$
Fichte/Tanne S_{R7} : $\sigma_{B12} = -0,08 \omega + 0,04 I_{BW} - 0,17 Qz + 178,6 \rho_{12} - 48,2 A - 30,6$ n = 103 (Messungen an 10 Balken), $r_m = 0,76$ $F_{Tab.} = 2,10 > F_{exp.} = 1,94 \rightarrow$ Adäquatheit $f_{5\%}$
Kiefer S_{R10}: $\sigma_{B12} = -0,13 \omega + 0,56 I_{BW} - 0,50 Qz + 118,2 \rho_{12} - 62,9 A - 17,8$ S_{R7} : $\sigma_{B12} = -0,13 \omega + 0,56 I_{BW} - 0,50 Qz + 118,2 \rho_{12} - 62,9 A - 7,8$ n = 126 (Messungen an 11 Balken), $r_m = 0,52$ $F_{Tab.} = 2,09 > F_{exp.} = 1,68 \rightarrow$ Adäquatheit $f_{5\%}$

Tab. A-39: Ergebnisse der multiplen Regression der Balken für den E-Modul

abhängige Variable: E_{12} [g/cm³] unabhängige Variablen: ω [Feuchtigkeitsgehalt in %]; I_{BW} [Bohrwiderstand in %/mm]; Qz [Querschnittszone]; ρ_{12} [Rohdichte in g/cm ³]; A [Ästigkeit der Zugseite]
alle Nadelholzprismen S_{R10}: $E_{12} = -56,4 \omega + 110,0 I_{BW} - 53,4 Qz + 16.070 \rho_{12} + 1.217 A - 1.152,3$ S_{R7} : $E_{12} = -56,4 \omega + 110,0 I_{BW} - 53,4 Qz + 16.070 \rho_{12} + 1.217 A + 561,6$ n = 229 (Messungen an 21 Balken), $r_m = 0,61$ $F_{Tab.} = 2,01 > F_{exp.} = 1,72 \rightarrow$ Adäquatheit $f_{5\%}$
Fichte/Tanne S_{R7} : $E_{12} = -15,7 \omega + 22,5 I_{BW} - 4,69 Qz + 17.776 \rho_{12} + 6.620 A - 531,1$ n = 103 (Messungen an 10 Balken), $r_m = 0,64$ $F_{Tab.} = 2,10 > F_{exp.} = 1,37 \rightarrow$ Adäquatheit $f_{5\%}$
Kiefer S_{R10}: $E_{12} = -45,6 \omega + 94,4 I_{BW} - 31,7 Qz + 54.657 \rho_{12} + 1.289 A - 21.475$ S_{R7} : $E_{12} = -45,6 \omega + 94,4 I_{BW} - 31,7 Qz + 54.657 \rho_{12} + 1.289 A - 20.653$ n = 126 (Messungen an 11 Balken), $r_m = 0,62$ $F_{Tab.} = 2,09 > F_{exp.} = 1,69 \rightarrow$ Adäquatheit $f_{5\%}$

A 3 Übersicht zu den Untersuchungen an den Balken und Prismen

Tab. A-40: Prüfungen an den Neuhölzern

Prüfung	Prüfkörper / Holzart			
<ul style="list-style-type: none"> • Bohrwiderstand • Ultraschallecho 	AP-FI-1 / Fichte	AP-KI-1 / Kiefer	AP-LA-1 / Lärche	
	AP-FI-2 / Fichte	AP-KI-2 / Kiefer	AP-LA-2 / Lärche	
	AP-FI-3 / Fichte	AP-KI-3 / Kiefer	AP-LA-3 / Lärche	
	AP-FI-4 / Fichte	AP-KI-4 / Kiefer	AP-LA-4 / Lärche	
<ul style="list-style-type: none"> • Biegefestigkeit • E-Modul • Druckfestigkeit • Schlagbiegefestigkeit 	AP-FI-3 / Fichte	AP-KI-3 / Kiefer	AP-LA-3 / Lärche	
	AP-FI-4 / Fichte	AP-KI-4 / Kiefer	AP-LA-4 / Lärche	

Tab. A-41: Prüfungen an den Althölzern

Prüfung	Prüfkörper / Holzart			
•Bohrwiderstand •Ultraschallecho	GTH I-R / Tanne	EF I / Fichte	MGN I / Kiefer	nur Bohrwiderstand:
	GTH I-L / Tanne	EF II / Fichte	MGN II / Kiefer	FT I / Fichte
	GTH II-R / Tanne	EF V / Fichte	MGN III / Kiefer	FT II / Fichte
	GTH II-L / Tanne	EF VI / Fichte	MGN IV / Kiefer	FT III / Fichte
	GTH III-R / Tanne	EF VII / Fichte	MGN V / Kiefer	FT IV / Fichte
	GTH III-L / Tanne	WE I / Fichte	MGN VI / Kiefer	FT V / Fichte
	GTH IV-R / Tanne	WE II / Fichte	MGN VII / Kiefer	FT VI / Fichte
	GTH IV-L / Tanne	WE IV / Fichte	MGN VIII / Kiefer	
	Az I / Fichte	CA WE I / Fichte	WE III / Kiefer	
	Az II / Fichte	WE X / Kiefer	HO I / Kiefer	
	Az III / Fichte			
<u>Balken</u> •Biegefestigkeit •E-Modul	GTH I-R / Tanne	GTH IV-L / Tanne	EF I / Fichte	MGN III / Kiefer
	GTH I-L / Tanne	FT I / Fichte	EF II / Fichte	MGN IV / Kiefer
	GTH II-R / Tanne	FT II / Fichte	EF V / Fichte	MGN V / Kiefer
	GTH II-L / Tanne	FT III / Fichte	EF VI / Fichte	MGN VI / Kiefer
	GTH III-R / Tanne	FT IV / Fichte	EF VII / Fichte	MGN VII / Kiefer
	GTH III-L / Tanne	FT V / Fichte	MGN I / Kiefer	MGN VIII / Kiefer
	GTH IV-R / Tanne	FT VI / Fichte	MGN II / Kiefer	
<u>Prismen</u> •Biegefestigkeit •E-Modul	FT II / Fichte	FT VI / Fichte	MGN III / Kiefer	
	FT III / Fichte	SB I A1 / Fichte	MGN III / Kiefer	
	FT IV / Fichte		MGN IV / Kiefer	
	FT V / Fichte		MGN VIII / Kiefer	
•Druckfestigkeit •Schlagbiegefestigkeit	GTH II-R / Tanne	MGN VI / Kiefer	nur Druckfestigkeit:	nur Druckfestigkeit:
	GTH II-L / Tanne EF	WE I / Fichte	SB I A1 / Fichte	FT I / Fichte
	I (A1) / Fichte	WE III (Ag2r) /	SB I A3 / Fichte	FT II / Fichte
	EF I (Ag3) / Fichte	Kiefer	SB I B1 / Fichte	FT III / Fichte
	EF III / Fichte	WE III (Ag2I) /	SB I B2 / Fichte	FT IV / Fichte
	EF IV / Fichte	Kiefer	SB II A1 / Fichte	FT V / Fichte
	EF VIII / Fichte		SB II A2 / Fichte	FT VI / Fichte
•Chemische Analyse	CA WE I / Fichte			
	WE X / Kiefer			

Herkunft der Balken: **Az-** Azmannsdorf, Kirchstraße; Sparren, Deckenbalken; **GTH-** Gotha, Waidhaus; Deckenbalken; **MGN-** Meiningen, Alte Kaserne; Deckenbalken; **FT-** Freital-Hainsberg, Dresdner Straße; Lagerhölzer; **EF-** Erfurt, Pergamentergasse; Sparren; **WE-** Weimar, Otto-Schott-Straße; Deckenbalken; **WE X-** Weimar, Coudraystraße; Balkenstütze; **SB-** Schneeberg, Siebenschleherer Pochwerk; Deckenbalken; **HO-** Holzdorf, Lagerhof Fa. Bennert; Deckenbalken/Unterzug

A 4 Weitere Untersuchungen

A 4.1 Bohrwiderstand an Sperrholzprismen

Die Untersuchung diente der Verfahrensverifizierung und der Beschreibung von verfahrensbedingten Fehlern. Für diesen Zweck wurde quasi-homogenes Sperrholzmaterial ausgewählt. Die Sperrholzprismen wurden unter Normklima gelagert, so dass neben den Rohdichte- ebenso die Feuchtigkeitswerte in engen Grenzen variierten (Abb. A-9). Die mittlere Rohdichte wurde mit $0,69 \text{ g/cm}^3$ bei einer maximalen Abweichung vom Mittelwert von $\pm 0,02 \text{ g/cm}^3$ und einem mittleren Feuchtigkeitsgehalt von $9,6 \%$ bei einer maximalen Abweichung vom Mittelwert von $\pm 0,35 \%$ ermittelt.

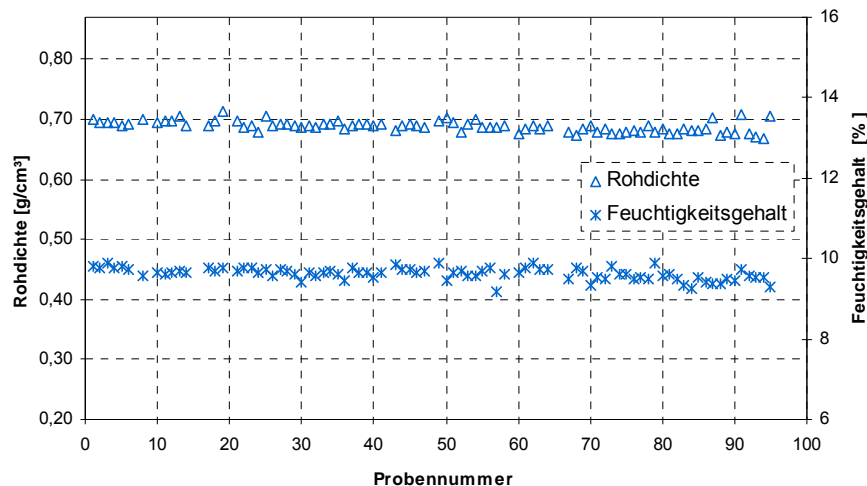


Abb. A-9: Serie Sperrhölzer, Rohdichte- und Feuchtigkeitsgehalte

Tab. A-42: Verteilungskennwerte der Rohdichte und Ausgleichsfeuchte der Sperrholzprobekörper

Prüfkriterium	n	\bar{x}	s	v [%]
$\rho_{12} [\text{g/cm}^3]$	85	0,69	0,01	1,3
$\omega [\%]$	85	9,6	0,15	1,5

Mit der Prüfkörperanzahl von 86 Stück wurde ein Test auf Normalverteilung nach DAVID durchgeführt und positiv bestätigt. Die Verteilung der Rohdichte und des Feuchtigkeitsgehaltes ist in Abb. A-10 und Abb. A-11 dargestellt.

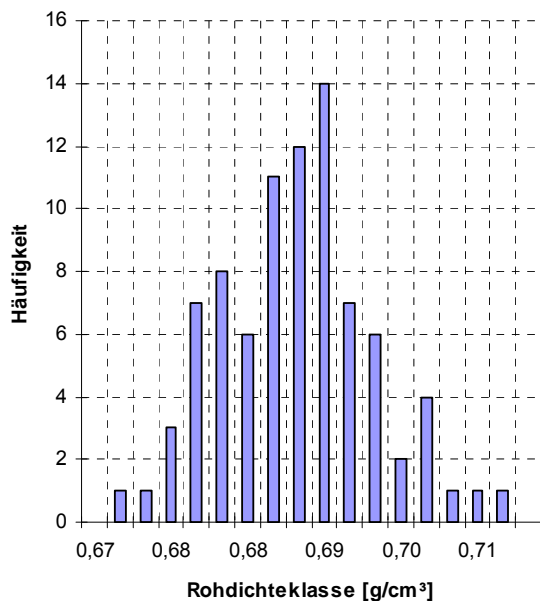


Abb. A-10: Histogramm der Verteilung der Rohdichtekennwerte

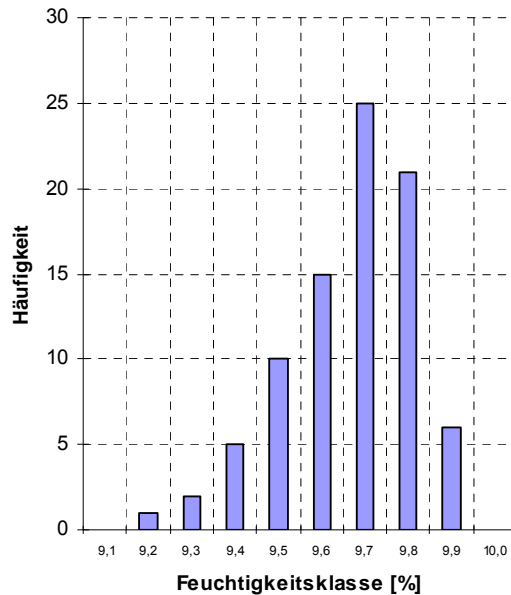


Abb. A-11: Histogramm der Verteilung der Feuchtigkeitskennwerte

Insgesamt stellten sich die Sperrholzprismen damit als geeignetes Ausgangsmaterial für die orientierenden Untersuchungen dar.

Im Rahmen der Vorversuche wurde der Vorschub je Bohrung variiert (Modus 1 und Modus 2) und im Modus 3 zusätzlich mit wechselndem Vorschub (manuell) während einer Bohrung geprüft.

Die Ergebnisse der Bohrmodi wurden verglichen und sind in Abb. A-12 wiedergegeben. Es ist festzustellen, dass die überlagerten Kurven nicht exakt deckungsgleich sind und zum Teil versetzte oder überhöhte Amplitudenpeaks aufweisen. Neben den verfahrensbedingten Fehlern fließen die anatomischen und technischen Variationsmöglichkeiten des Sperrholzes ein. Wenn beispielsweise durch eine Fehlstelle in der Furnierlage an diesem Punkt mehr Kleber eindringen konnte, ist an dieser Stelle mit einem erhöhten Bohrwiderstand zu rechnen. Andererseits können feinste Fehlstellen des Furniers oder Lufteinschlüsse in der Verklebung zur Reduzierung des Bohrwiderstandes führen. Auch Asteinschlüsse können in geringem Umfang vorhanden sein und beeinflussen den Bohrwiderstand.

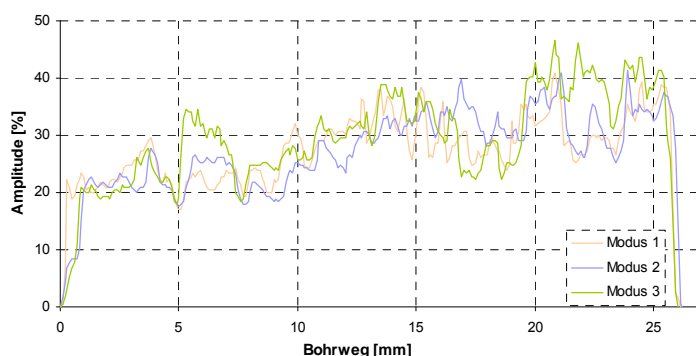


Abb. A-12: Vergleich unterschiedlicher Bohrmodi mit Variation der Vorschubgeschwindigkeit

Die Bohrwiderstandswerte aller Modifikationen sind in Abb. A-13 zusammengestellt und liegen innerhalb des Rohdichtespektrums auf vergleichbarem Niveau.

Bei allen Bohrmodi lagen die Variationskoeffizienten bei 5 %. Diese Ergebnisse sind insofern überraschend, dass bei wechselnden Vorschubgeschwindigkeiten während eines Bohrvorganges

stärkere Schwankungen und größere Abweichungen des Bohrwiderstandes erwartet wurden. Auch die Vermutung, dass sich Maxima und Minima der verschiedenen Bohrmodi deutlicher abgrenzen, kann bei einem Vergleich der Messkurven nicht bestätigt werden.

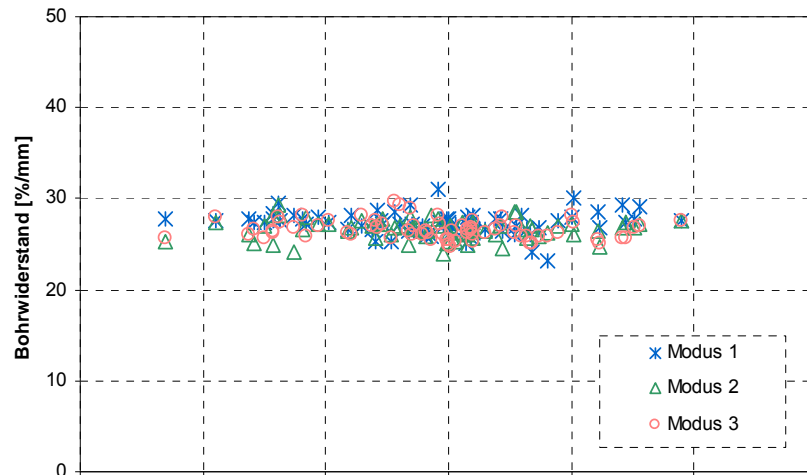


Abb. A-13: Bohrwiderstand der Bohrmodi

Tab. A-43: Verteilungskennwerte des Bohrwiderstandes der Sperrholzprobekörper

Prüfkriterium I_{BW} [%/mm]	n	\bar{x}	s	v [%]
Modus 1	73	27,3	1,24	4,5
Modus 2	73	26,6	1,1	4,0
Modus 3	71	26,6	1,0	3,9
alle Modi	217	26,8	1,1	4,3

An 15 Proben wurde entgegengesetzt gebohrt, um Aussagen zum verfahrensbedingten Bohrtrend treffen zu können. Im Ergebnis wurde bei allen Proben ein Amplitudenanstieg aus verfahrensbedingten Gründen ermittelt. Damit ist festzustellen, dass Proben mit stark abweichender Bohrlänge nur unter Berücksichtigung des Bohrtrends direkt miteinander in Bezug gesetzt werden können, da mit fortschreitender Bohrlänge der Bohrtrend wegen der wenig quantifizierbaren Randbedingungen zunimmt. Durch diesen Effekt steigt der Bohrwiderstand für alle nicht direkt aus dem Verfahren bestimmbaren Messgrößen. Der Geltungsbereich dieser Aussagen ist aufgrund der gewählten Methodik auf eine mittlere Rohdichte von $0,67 \text{ g/cm}^3$ beschränkt. Wie die Untersuchungen an Fichten-, Kiefern- und Lärchenholz im Hauptteil der Arbeit bestätigt haben, nimmt der erkennbare Einfluss des Bohrtrends mit sinkender Rohdichte ab.

Aus den Ergebnissen der Messungen an den Sperrholzprobekörpern kann weiterhin abgeleitet werden, dass die verfahrensbedingte Abweichung des Messwertes (Messungenauigkeit) unter 5 % liegt. Der gerätebedingte Messfehler liegt wahrscheinlich deutlich darunter, da bei den hier ermittelten Werten zusätzliche Effekte durch die Werkstoffstruktur hervorgerufen wurden.

A 4.2 Applikation des Bohrwiderstandes der Prismendaten auf die Balken

Die Bohrung über den Gesamtquerschnitt wird durch den anatomisch bedingten Wechsel von radial und tangential durchbohrten Jahrringen bestimmt. Im Abschnitt 6.3.2.1 wurden vereinfacht drei Fälle der Jahrringorientierungen untersucht.

Ob Einzelmessungen an Prismen mit dem Bohrweg über die Gesamtstrecke vergleichbar sind, wurde für Fichte und Kiefer untersucht. Dafür wurden die an den Fichte- und Kiefern balken durchgeführten Bohrungen den auf dem Bohrweg liegenden Prismen und bei jedem Einzelprisma deren Orientierung zugeordnet. Zur Auswahl kamen 50 Prismen mit jeweils vier Bohrwiderstandsmessungen.

Der Abgleich der Einzelmessungen der Prismen mit der Gesamtmessung am Balken war schwierig, da einerseits die Einzelmessungen in Prismenmitte durchgeführt wurden und andererseits die Balkenbohrungen durch Verlaufen teilweise ausgelenkt oder durch örtliche Inhomogenitäten beeinflusst waren.

Bei nur unzureichender Übereinstimmung der Prismen- mit den Balkenbohrungen wurden höhere Abweichungen bis 40 % ermittelt. In den Fällen, bei denen der Bohrweg über den Querschnitt mit der Aneinanderreihung der einzelnen Prismenbohrungen dargestellt werden konnte, ließ sich der Bohrwiderstandskennwert mit 3 % Abweichung bei den Prismen gegenüber denen der Balken ermitteln. In der grafischen Überblendung von Balken- und den aneinander gereihten Prismenbohrungen der Abb. A-14 und Abb. A-15 lässt sich der Bohrweg des Balkens insgesamt gut nachvollziehen. Das ist aber nur dann möglich, wenn o. g. Randbedingungen ausgeräumt werden konnten. Der Versatz der Amplitudenspitzen resultiert aus der nicht exakt mit der Jahrringlage übereinstimmenden Bohrstelle. Das macht sich insbesondere um die Markröhre (Querschnittszone 1) bei etwa 90 mm Bohrtiefe bemerkbar. Durch die dort sehr kleinen Radien der Jahrringe ist der Wechsel der tangentialen und radialen Richtung auf engem Raum vorhanden. Dadurch weicht der Bohrwiderstand des an dieser Stelle entnommenen Kleinprüfkörpers von dem der Balkenbohrung ab. Außerhalb der Querschnittszone 1 sind die Abweichungen geringer.

Der Bohrwiderstand aus den Einzelprismen ist nur dann auf die Bohrung des Balkens übertragbar, wenn beide Bohrstellen übereinstimmen und frei von der Beeinflussung durch Holzfehler (z. B. Äste) sind.

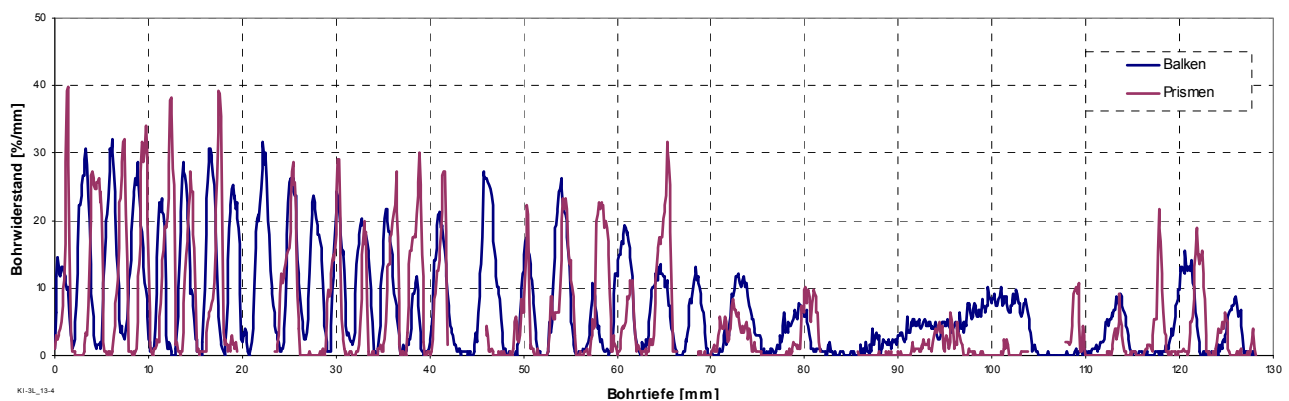


Abb. A-14: Überlagerung der Bohrwiderstandsmessungen eines Kiefern balkens mit denen der Prismen (Querschnittszone 1)

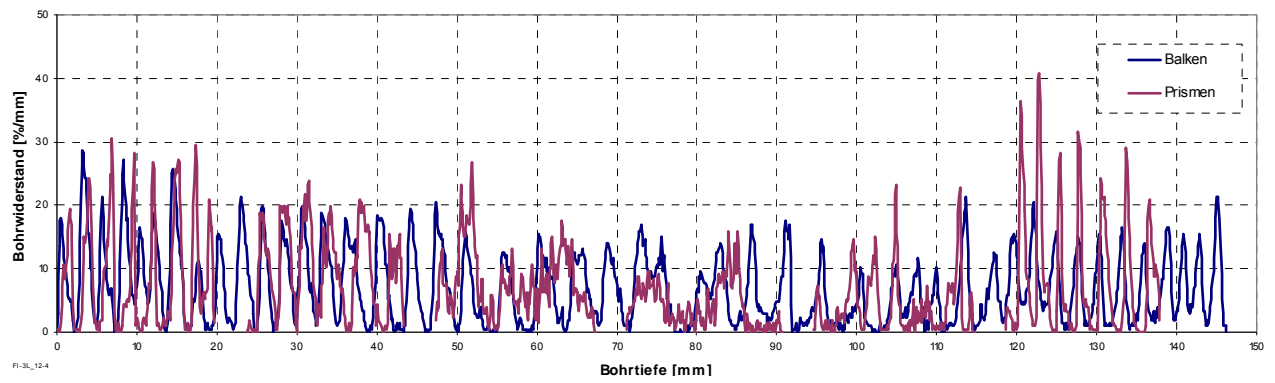


Abb. A-15: Überlagerung der Bohrwiderstandsmessungen eines Fichtebalkens mit denen der Prismen (Querschnittszone 2)

A 4.3 Bohrwiderstand im Schadensübergangsbereich

Neben dem im Hauptteil der Arbeit vorgestellten Probekörper, diente ein weiterer zur Untersuchung der Schadensübergangszone. Die Rasterverdichtung und die Anordnung der Bohrungen erfolgten analog dem Probekörper 1 von der ungeschädigten Oberseite aus (Abb. A-16).



Abb. A-16: Probekörper 2 der Untersuchung der Übergangszone (ungeschädigte Oberseite)

Es wurden dieselben Algorithmen wie bei dem Probekörper 1 eingesetzt, einschließlich der farblichen Codierung bei der Auswertung (Abb. A-17). Danach ist der überwiegende rückwärtige Bereich als stark geschädigt markiert. Aus der Ergebnisgrafik sind Übergangsbereiche zu den Längsrändern hin erkennbar.

Auch bei diesem Probekörper lassen sich die aus der Grafik ermittelten Schädigungen nach Vergleich mit der sichtbaren Schädigung nachvollziehen (Abb. A-18 und Abb. A-19).

Zudem konnte die Schädigung im Anschluss an das gesunde Holz (links in Abb. A-18) über die Bohrwiderstandsmessung nachgewiesen werden. Diese offenbarte sich bei visueller Kontrolle der Oberfläche nicht.

Auch bei Probekörper 2 war es mit Hilfe der Bohrwiderstandsmessung möglich, innerhalb des Schadensübergangsbereiches Befallsstufen zu differenzieren.

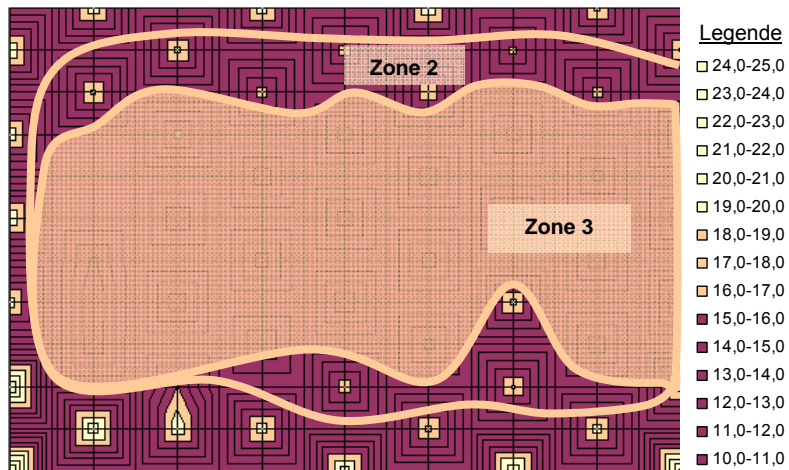


Abb. A-17: Messwertdarstellung des Prüfkörpers 2 (Bohrwiderstandsintegral) mit Markierung der potenziellen Schadenszonen 2 und 3



Abb. A-18: Probekörper 2 der Untersuchung der Übergangszone (geschädigte Unterseite)



Abb. A-19: Probekörper 2, Querschnitt mit Holzschädigung (links) gegenüber der beprobten Seite (rechts) durch Verfärbung am Schnitt erkennbar

A 4.4 Chemische Analysen des Schadensübergangsbereiches

Die Unterscheidung in drei Schadensbereiche unterstellt unterschiedliche Abbaustadien und damit unterschiedliche Anteile an Hauptinhaltsstoffen. Exemplarisch fanden dazu Untersuchungen an zwei durch Braunfäule geschädigten Balkenquerschnitten statt. Die Schädigung an den beiden Probekörpern wurde einerseits durch den Echten Hausschwamm (*Serpula lacrymans*) andererseits durch den Tannen-/Zaunblättling (*Gleophyllum* spp.) ausgelöst (Abb. A-20 und Abb. A-21).



Abb. A-20: Geschädigter Probekörper [*Serpula lacrymans* (Wulf in Jacq.:Fr.) Schroeter] mit Markierung der Analysestellen der chemischen Untersuchungen

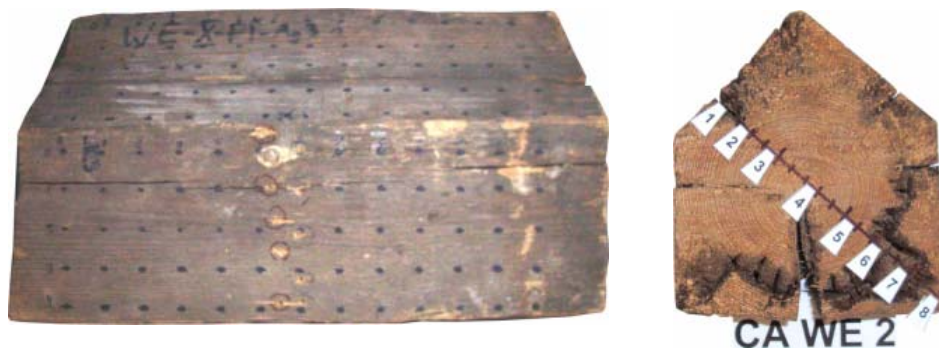


Abb. A-21: Geschädigter Probekörper (*Gleophyllum* spp.) mit Markierung der Analysestellen der chemischen Untersuchungen

Zur Analyse von Zellulose, Hemizellulosen und Lignin wurde entlang einer definierten Probenachse Material entnommen. Die Untersuchung erfolgte durch nasschemische Analyse am Institut für Holz- und Papiertechnik Dresden. Nach Probenaufbereitung und Extraktion wurden die jeweiligen Hauptbestandteile Lignin, Zellulose und Hemizellulosen bestimmt.

Für den durch Echten Hausschwamm zerstörten Balken wurde eine Verteilung der Hauptbestandteile gemäß Abb. A-22 festgestellt.

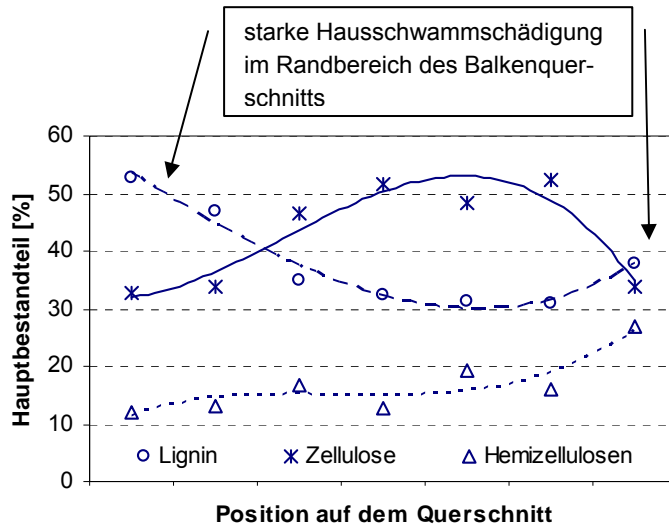


Abb. A-22: Verteilung der Hauptinhaltsstoffe über den Querschnitt des durch Echten Hausschwamm geschädigten Probekörpers

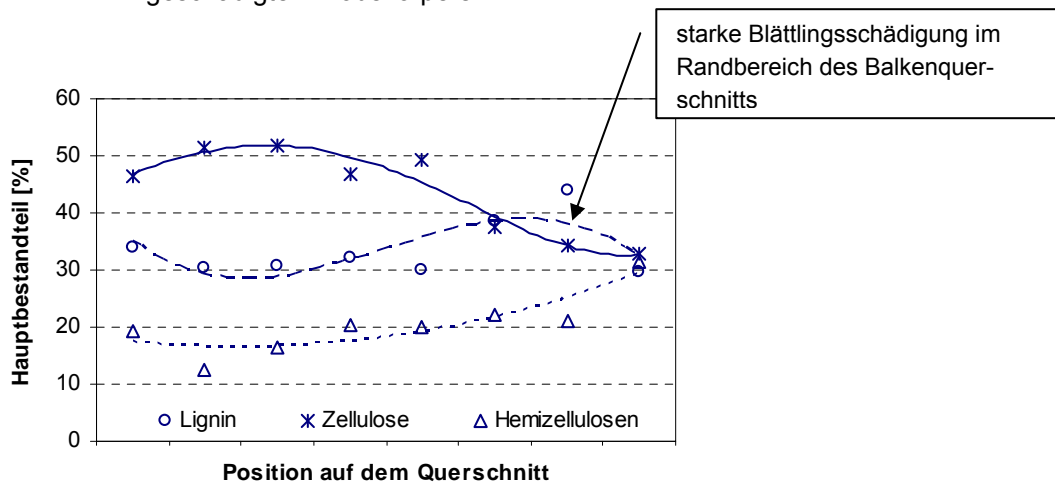


Abb. A-23: Verteilung der Hauptinhaltsstoffe über den Querschnitt des durch Blättlinge geschädigten Probekörpers

Die Kurven wurden über den Querschnitt gelegt, um Abhängigkeiten der sichtbaren Schäden mit dem Anteil der Hauptbestandteile qualitativ bewerten zu können.

Es wurde festgestellt, dass bei Angriff der Braunftäule der relative Anteil an Lignin zunimmt und der der Zellulose sinkt. Nach den Ergebnissen gemäß der Abb. A-24 bis Abb. A-29 ist die Übergangszone anteilig an dem Wechsel des Verhältnisses beteiligt.

Die Schadenszone 1 befindet sich im Bereich des maximalen relativen Zellulosegehaltes. Bei maximalem Ligninanteil ist das Holz durch den Pilzbefall am stärksten geschädigt.

Die Einordnung der Hemizellulosen in diese recht klare o. g. Verteilung war nicht so eindeutig möglich. Es lässt sich jedoch der Trend ablesen, dass mit sinkendem Gehalt an Zellulose der Anteil an Hemizellulosen steigt.

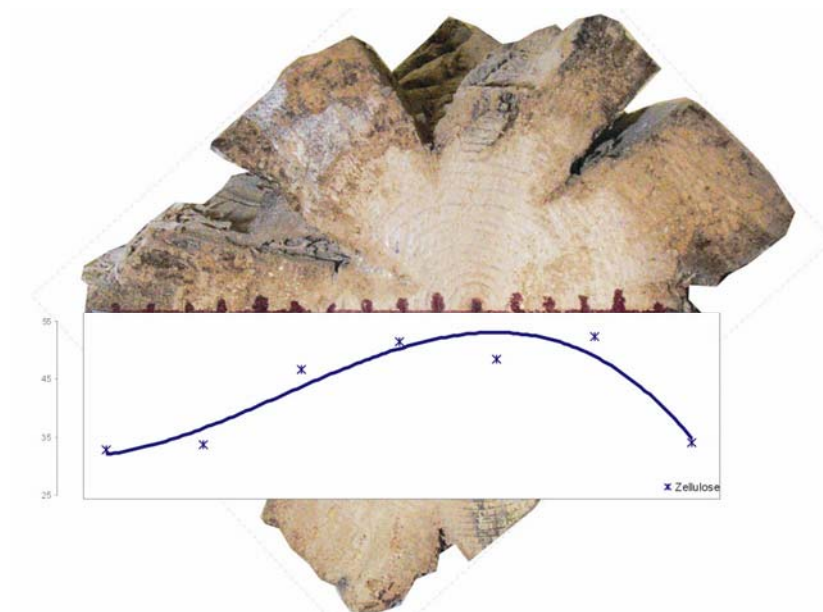


Abb. A-24: Veränderung des Gehaltes an Zellulose bei der Holzschädigung durch Echten Hausschwamm

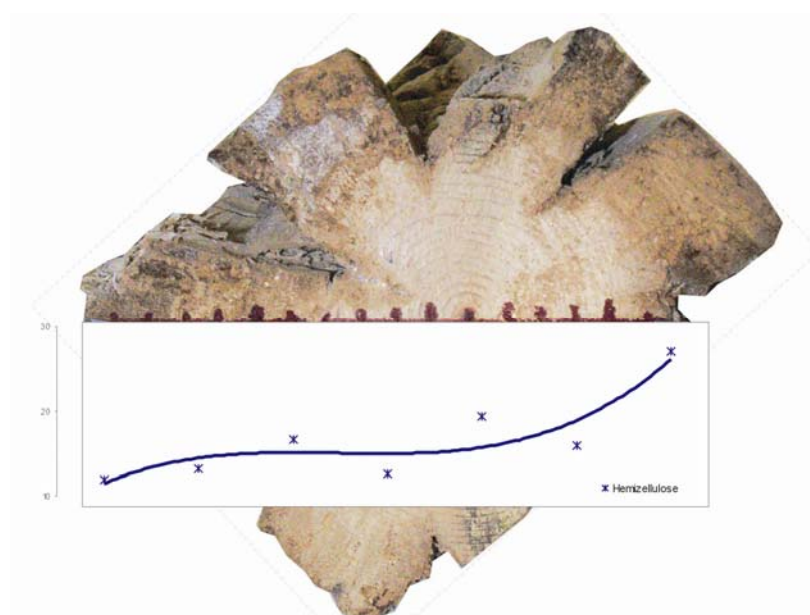


Abb. A-25: Veränderung des Gehaltes an Hemizellulosen bei der Holzschädigung durch Echten Hausschwamm

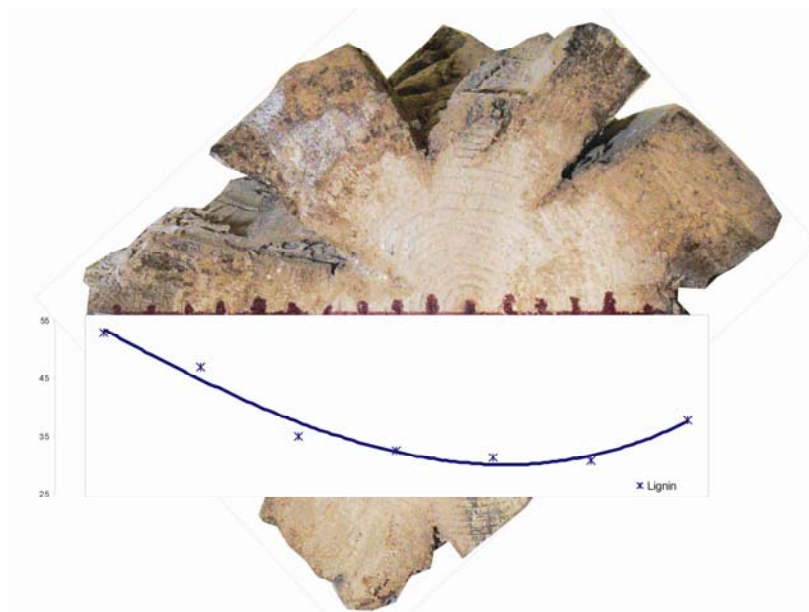


Abb. A-26: Veränderung des Gehaltes an Lignin bei der Holzschädigung durch Echten Hausschwamm

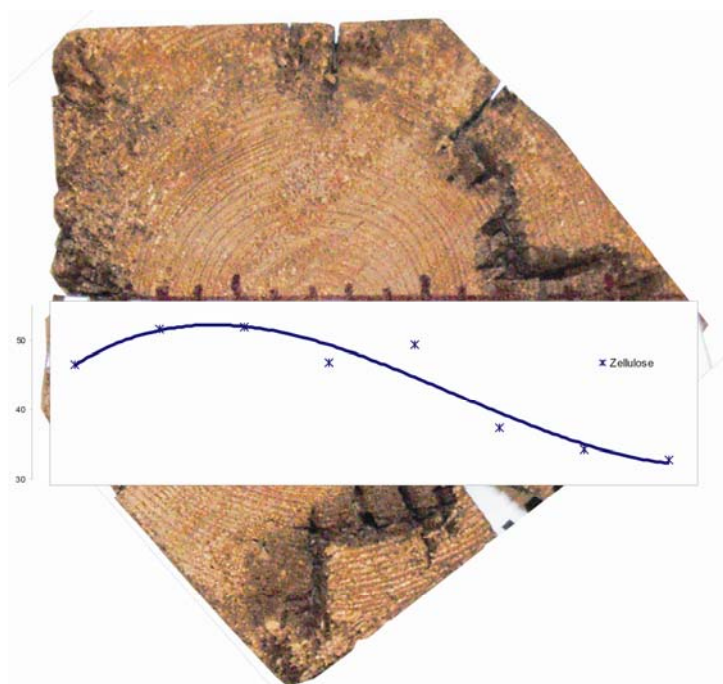


Abb. A-27: Veränderung des Gehaltes an Zellulose bei der Holzschädigung durch Blättlinge

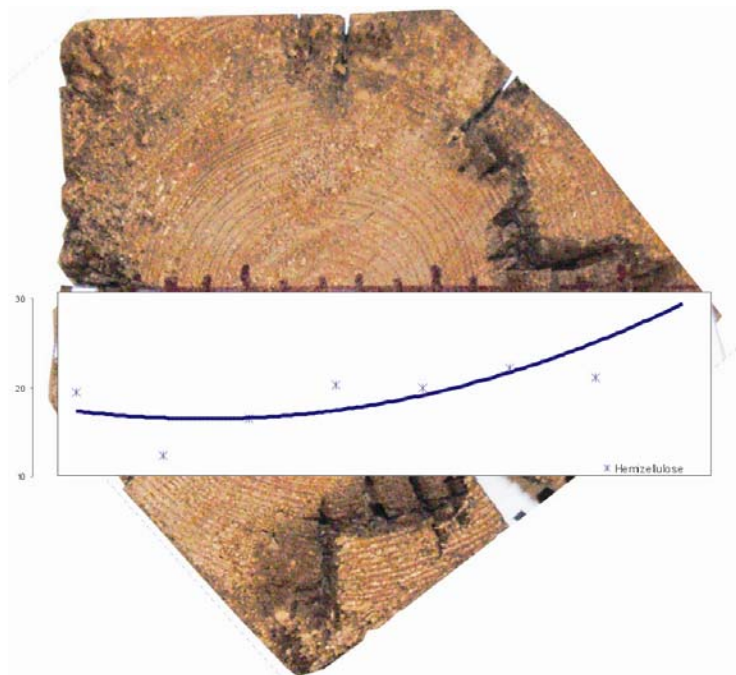


Abb. A-28: Veränderung des Gehaltes an Hemizellulosen bei der Holzschädigung durch Blättlinge

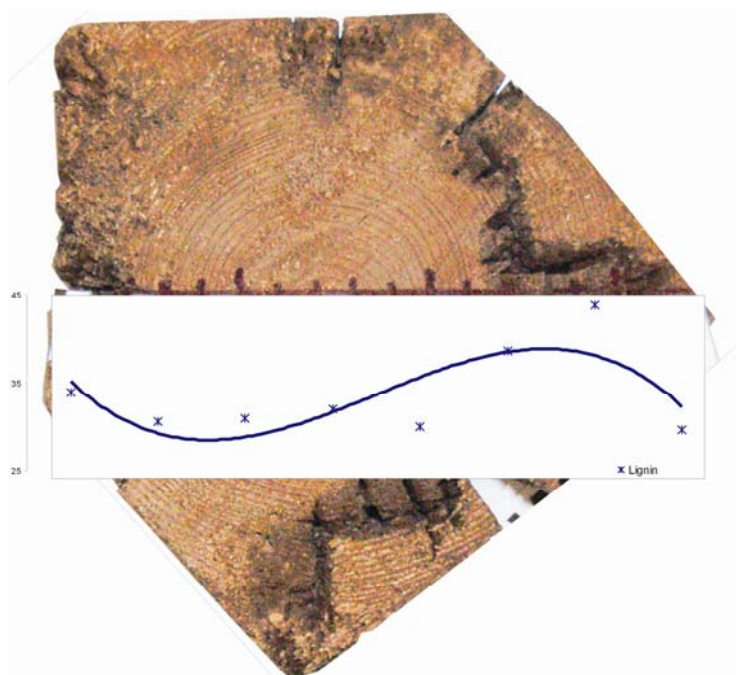


Abb. A-29: Veränderung des Gehaltes an Lignin bei der Holzschädigung durch Blättlinge

Bei Einteilung in die Schadenszonen werden die Abhängigkeit von der Eindringtiefe der Pilzhyphen und damit die Abbaustadien deutlich.

In Abb. A-30 sind die nach den beiden Querschnittsuntersuchungen ermittelten Gehalte der Hauptinhaltsstoffe den Schadenszonen zugeordnet.

Der prozentuale Anteil des Lignins steigt um 36 % gegenüber einem Abfall der Zellulose um 27 % im Vergleich der nahezu ungeschädigten Zone 1 mit der völlig zerstörten Zone 3. Die mit der Aktivität der Zellulasen verbundene Aufspaltung der langkettigen Zellulose in kurzgliedrige Polymere, die als Hemizellulosen analysiert werden, kann gemäß Abb. A-30 bestätigt werden. Deren relativer Anteil stieg in den Schadenszonen 2 und 3 um 10 % bzw. 15 % an.

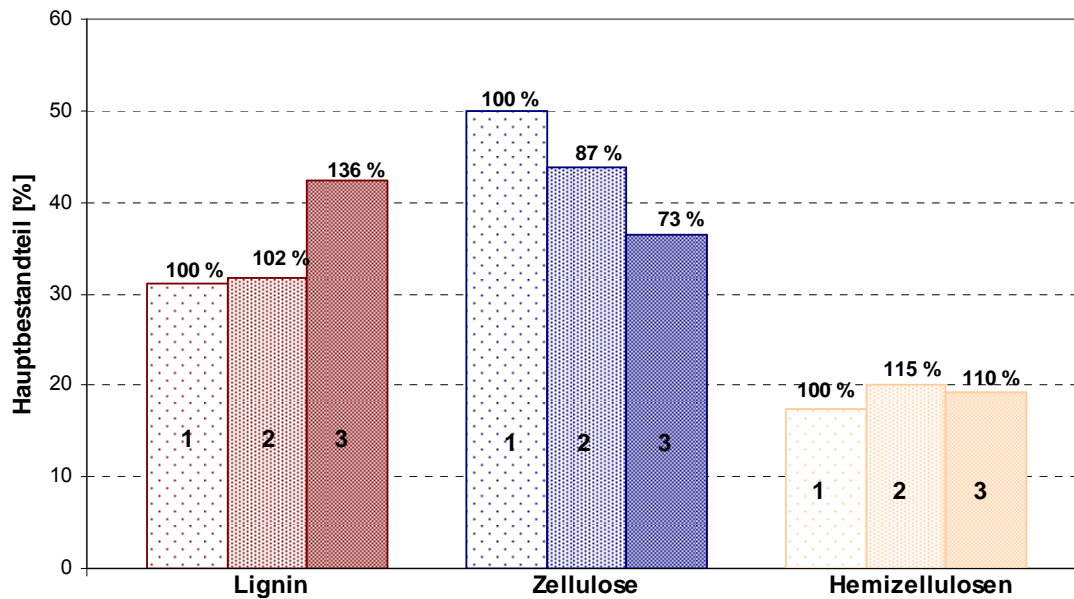


Abb. A-30: Relative Anteile von Lignin, Zellulose und Hemizellulosen in den Schadenszonen 1 bis 3